

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СТУПЕНЧАТЫХ АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Будучи более дешевой альтернативой традиционному механическому крепежу, клеевые соединения находят все более широкое применение при создании конструкций самого различного назначения [1, 2]. Помимо удешевления, сокращения и упрощения сборочных операций такой тип соединения имеет и другие преимущества – снижение массы, повышение стойкости к повреждениям, увеличение надежности (за счет отсутствия локальных концентраторов напряжений, присущих механическим соединениям), гибкость в выборе конструктивно-технологических решений (КТР) на этапе проектирования и т. д. Кроме того, склеивание является наиболее предпочтительным способом сборки композитных элементов конструкции, так как при этом не нарушается целостность армирующего материала.

Принципиальное отличие адгезионных соединений заключается в том, что передача нагрузки осуществляется через поверхностные слои материала. Поэтому традиционные решения в виде одно- или двухсторонних нахлесточных соединений предполагают склеивание деталей с небольшой толщиной, т. е. могут использоваться только в слабонагруженных конструкциях. Ступенчатые соединения позволяют в определенном смысле обойти эти ограничения, обеспечивая более равномерное распределение нагрузки по толщине деталей благодаря постепенному включению в работу внутренних слоев материала.

Вопросам проектирования и расчета клеевых соединений различной конфигурации посвящено большое количество исследований [2, 3]. Наиболее очевидным параметром в ступенчатых соединениях является число участков, что и обуславливает тематику работ, направленных, в первую очередь, на изучение зависимости между данным показателем и напряженно-деформированным состоянием в деталях и клее (например, [4, 5]). Определенный интерес представляют исследования, в которых рассматриваются вопросы влияния на несущую способность адгезионных соединений клеевых композиций с изменяющимися по длине свойствами [6, 7]. Вместе с тем обзор источников показывает, что проблемы варьирования длины ступенек или толщины клеевой прослойки слабо раскрыты или не изучены вовсе, хотя сами принципы технической реализации ступенчатых соединений позволяют осуществлять и такое управление основными характеристиками, определяющими величину предельной нагрузки. Поэтому представляется актуальной задача комплексной оценки степени влияния различных параметров на напряженно-деформированное состояние ступенчатых соединений.

В данной работе в качестве расчетной модели используется классическая одномерная модель Фолькерсена, согласно которой сдвиговые компоненты напряжений и деформаций присутствуют только в клеевой прослойке. Такой подход не позволяет учесть возможные моментные силовые факторы, возникающие вследствие неравномерности распределения нормальных и касательных напряжений по толщине деталей и клея и провоцирующие появление отрывных усилий, что негативно сказывается на прочности соединения в целом. Однако в ступенчатых соединениях подобные побочные эффекты выражены слабо [4, 5] (ввиду меньшего эксцентриситета нагрузки и более рационального распределения жесткости по длине), поэтому применение одномерной модели в данном случае вполне оправдано. Различные варианты ее математической реализации рассматривались, например, в работах [4, 8, 9]; ниже используется подход, предложенный в [9] и основанный на одном из самых эффективных методов решения систем уравнений с трехдиагональной матрицей коэффициентов – алгоритме Томаса.

Постановка численного эксперимента предусматривала варьирование следующих параметров ступенчатого адгезионного соединения (рис. 1):

- количества участков (ступенек) N ;
- длины участков L_i ;
- толщины клеевой прослойки $t_{a(i)}$;
- модуля сдвига клея $G_{a(i)}$.

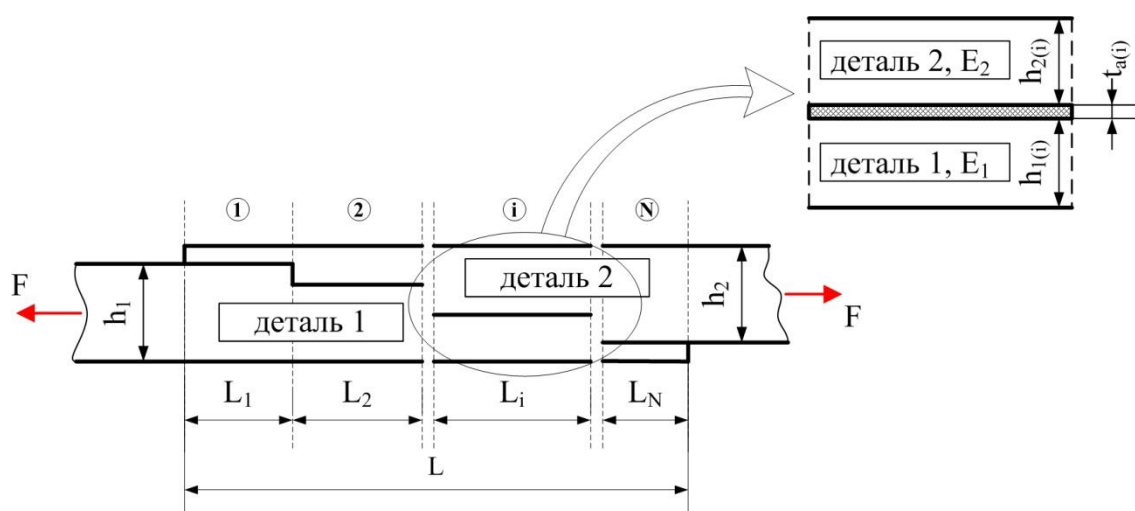


Рисунок 1 – Геометрические параметры ступенчатого соединения и его i -го участка

Для корректной оценки влияния того или иного параметра на массовую эффективность соединения и общности выводов количество клея считалось постоянным, соответствующим средней толщине $t_a = 0.2$ мм.

Среднее значение модуля сдвига по длине соединения составляло $G_a = 1.5$ ГПа. Длина соединения L , условия нагружения и внешние усилия F , материал деталей и их толщина в регулярной зоне (т. е. вне соединения) также были одинаковыми во всех расчетных случаях: $L = 120$ мм; $F = 900$ Н/мм; $E_1 = E_2 = 70$ ГПа; $h_1 = h_2 = 9$ мм. В качестве сравнительных характеристик соединения использовались безразмерные величины $\bar{\tau}_a$ и \bar{m}_r :

$$\bar{\tau}_a = \frac{\tau_{c \max}}{\tau_{o \max}}; \quad \bar{m}_r = \frac{m_{\Sigma c}}{m_{\Sigma o}}, \quad (1)$$

где $\tau_{c \max}$, $\tau_{o \max}$ – максимальные значения касательных напряжений в клее в ступенчатом и обычном нахлесточном соединениях соответственно;

$m_{\Sigma c}$, $m_{\Sigma o}$ – общая масса деталей в ступенчатом и обычном нахлесточном соединениях соответственно.

Графики, представленные на рис. 2, наглядно демонстрируют основные преимущества ступенчатых соединений: они позволяют не только снизить касательные напряжения в клее, повышая тем самым несущую способность, но и добиться существенного снижения массы конструкции. Следует отметить, что при оценке общей экономической эффективности таких КТР необходимо учитывать и другие факторы. Например, определенное усложнение техпроцесса, который должен включать в себя операции для формирования дискретного изменения толщины соединяемых деталей. Это, в свою очередь, подразумевает возможное уменьшение коэффициента использования материала и т. д.

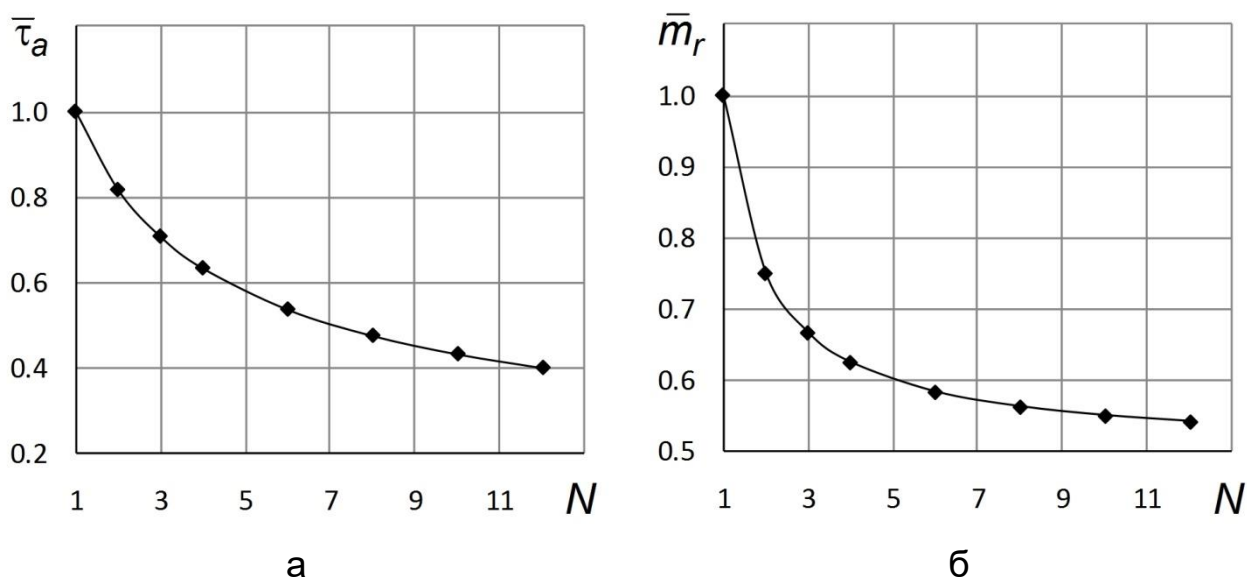


Рисунок 2 – Влияние количества ступенек на касательные напряжения в клее (а) и массу соединения (б)

Варьирование длины ступенек осуществлялось двумя способами, причем в обоих случаях соотношение длины двух соседних сегментов сохранялось постоянным (рис. 3). В первом варианте фиксировалось соотношение длины двух соседних ступенек

$$rL_1 = \frac{L_2}{L_1} = \frac{L_3}{L_2} = \dots = \frac{L_{\lceil N/2 \rceil}}{L_{\lceil N/2 \rceil - 1}}, \quad (2)$$

а во втором – соотношение длины центральной и внешних ступенек

$$rL_2 = \frac{L_{\lceil N/2 \rceil}}{L_1}. \quad (3)$$

Характер распределения L_j считался симметричным по длине соединения (см. рис. 3) ввиду симметрии внешней нагрузки и геометрии деталей. Для оценки эффективности соединения здесь также использовались относительные напряжения $\bar{\tau}_a$, только в данном случае в качестве базовой величины рассматривались максимальные касательные напряжения в клеевой прослойке соединения с аналогичным количеством ступенек N и $L_j = L/N = \text{Const}$, т. е. $\tau_{c \max}$ из формул (1):

$$\bar{\tau}_a(rL_j) = \frac{\tau_{c \max}(rL_j)}{\tau_{c \max}|_{rL_j=1}} = \frac{\tau_{c \max}(rL_j)}{\tau_{c \max}}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

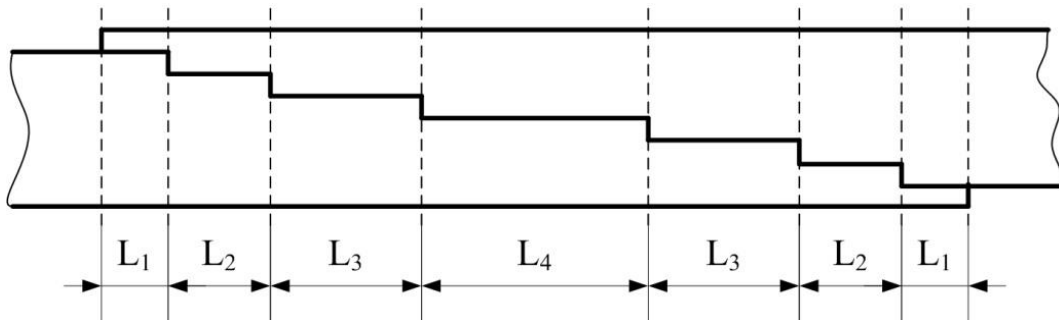


Рисунок 3 – Схема варьирования длины ступенек на примере 7-ступенчатого соединения

Графики на рис. 4 дают представление о влиянии параметров (2) и (3) на несущую способность соединения. Видно, что с увеличением значений rL_1 и rL_2 (что соответствует удлинению ступенек в центральной части) увеличиваются и максимальные касательные напряжения в клее. Причем этот негативный эффект усиливается с ростом сегментации соединения N и проявляется в большей мере при использовании первого способа (2), т. е. при увеличении неравномерности распределения L_j .

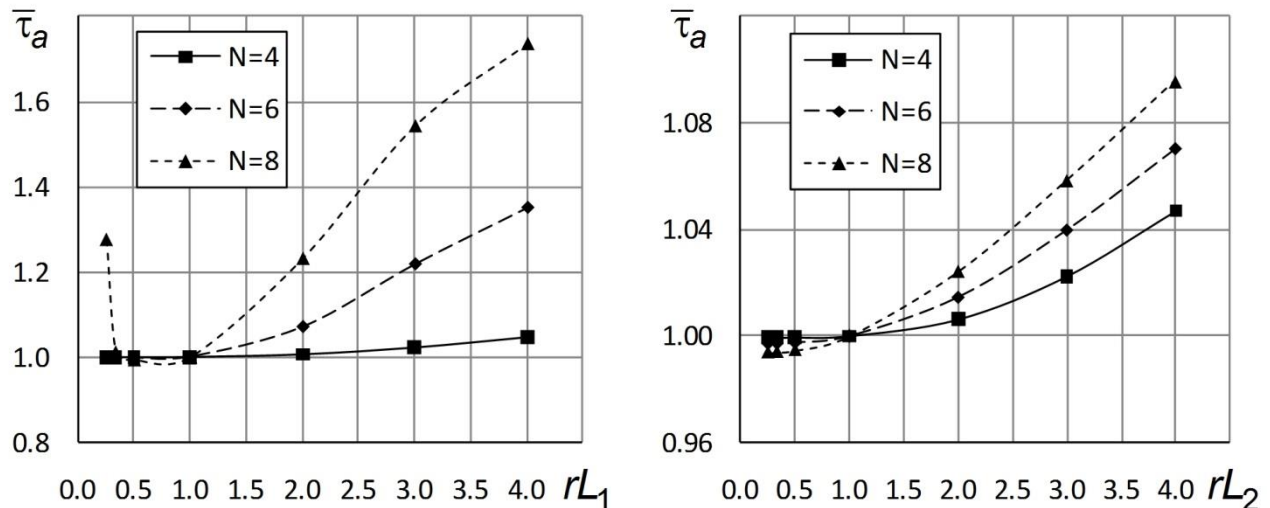


Рисунок 4 – Влияние распределения длины ступенек на касательные напряжения в клее

Напротив, удлинение внешних участков, т. е. уменьшение rL_1 и rL_2 , позволяет несколько снизить напряжения в клее, однако эффект при этом оказывается настолько мал, что им можно пренебречь, особенно если учесть несовершенство самой аналитической одномерной модели.

Аналогичный подход использовался и при варьировании толщины и жесткости клеевой прослойки: распределение этих характеристик по длине соединения было симметричным и подчинялось линейному закону. Неравномерность распределения определялась только соотношением указанных величин на центральном и внешних участках:

$$rT = \frac{t_{a(\lceil N/2 \rceil)}}{t_{a(1)}}; \quad rG = \frac{G_{a(\lceil N/2 \rceil)}}{G_{a(1)}}. \quad (5)$$

Относительные напряжения $\bar{\tau}_a$ вычислялись по формулам, аналогичным (4), где в качестве базовых величин также брались значения $\tau_{c \max}$ из выражений (1).

На рис. 5 показаны графики зависимости касательных напряжений в клее от параметров rT и rG . Как следует из этих диаграмм, увеличение податливости клеевой прослойки

$$\Pi_{a(i)} = \frac{t_{a(i)}}{G_{a(i)}}$$

в центральной части соединения приводит к увеличению касательных напряжений. Для их уменьшения необходимо или увеличивать толщину клея на внешних участках, или использовать на этих же участках менее жесткие клеевые композиции. Кроме того, по графикам видно, что влияние параметров rT и rG слабо коррелирует с количеством ступенек N .

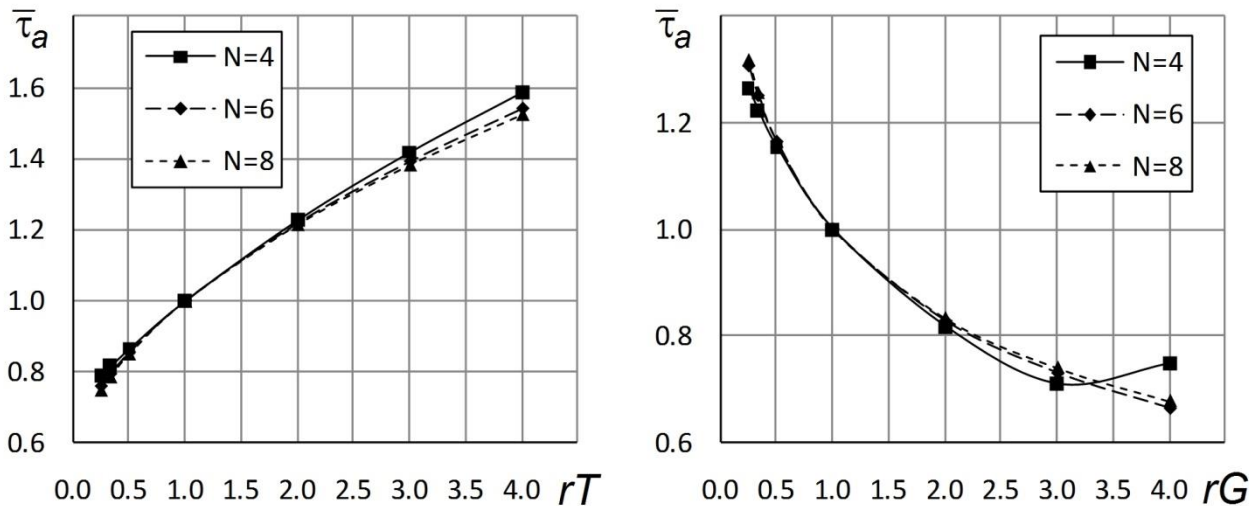


Рисунок 5 – Зависимость касательных напряжения в клее от распределения его толщины и жесткости по длине соединения

Таким образом, проведенные численные эксперименты позволяют сформулировать следующие выводы и рекомендации по проектированию ступенчатых клеевых соединений.

1. Наибольшее влияние на касательные напряжения в клее оказывает количество ступенек N . При прочих равных параметрах преимущество следует отдавать тем КТР, которые позволяют реализовать максимальное значение N .

2. Рациональное варьирование длины ступенек (удлинение внешних участков и укорочение центральных) практически не влияет на несущую способность. Для упрощения подготовительных операций целесообразно использовать КТР с одинаковой длиной всех участков.

3. Существенно уменьшить касательные напряжения в клее можно путем варьирования толщины деталей так, чтобы толщина клея уменьшалась от внешних участков к центру. Похожий результат достигается при использовании различных клеев (менее жесткие – на внешних участках, более жесткие – на центральных ступеньках).

Для увеличения положительного эффекта эти рекомендации можно сочетать. Например, если в соединении с указанными ранее исходными параметрами и количеством ступенек $N=4$ изменить толщину клея на участках ($t_{a(1)} = 2t_{a(2)} = 2t_{a(3)} = t_{a(4)} = 0.26$ мм) и его модуль сдвига ($2G_{a(1)} = G_{a(2)} = G_{a(3)} = 2G_{a(4)} = 2$ ГПа), то максимальные касательные напряжения в нем составят $\tau_{c \max} = 31.1$ МПа. Это в 2.2 раза меньше напряжений в обычном нахлесточном соединении и в 1.4 раза меньше напряжений в аналогичном 4-ступенчатом соединении, но с постоянными значениями $t_{a(i)} = 0.2$ мм и $G_{a(i)} = 1.5$ ГПа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Grant, L. D. R. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry / L. D. R. Grant, R. D. Adams, L. F. M. da Silva // International Journal of Adhesion and Adhesives. – Vol. 29. – 2009. – Pp. 405–413.
2. S. Budhe, M. D. Banea, S. de Barros, L. F. M. da Silva An updated review of adhesively bonded joints in composite materials / S. Budhe, M. D. Banea, S. de Barros, L. F. M. da Silva // International Journal of Adhesion and Adhesives. – Vol. 72. – 2017. – Pp. 30–42.
3. da Silva, L. F. M. Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey / L. F. M. da Silva, P. J. C. das Neves, R. D. Adams, J. K. Spelt // International Journal of Adhesion and Adhesives. – Vol. 29. – 2009. – Pp. 319–330.
4. Hart-Smith, L. J. Adhesive-bonded scarf and stepped-lap joints / L. J. Hart-Smith // NASA Contractor Reports. – CR-112237. – 1973.
5. Chuang, W. Y. Investigating the performances of stepwise patched double lap joint / W. Y. Chuang, J. L. Tsai // International Journal of Adhesion and Adhesives. – Vol. 42. – 2013. – Pp. 44–50.
6. da Silva, L. F. M. Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique / L. F. M. da Silva, M. J. C. Q. Lopes // International Journal of Adhesion and Adhesives. – Vol. 29. – 2009. – Pp. 509–514.
7. Kumar, S. On axisymmetric adhesive joints with graded interface stiffness / S. Kumar, J. P. Scanlan // International Journal of Adhesion and Adhesives. – Vol. 41. – 2013. – Pp. 57–72.
8. Карпов, Я.С. Общая методика определения напряженно-деформированного состояния адгезионных соединений в линейной одномерной постановке / Я. С. Карпов, П. М. Гагауз, Ф. М. Гагауз // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (78).– Х., 2014. – С. 7 – 20.
9. Гагауз, П.М. Инженерная методика расчета ступенчатых адгезионных соединений / П. М. Гагауз, Ф. М. Гагауз // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 90 (2).– Х., 2017. – С. 40 – 48.

Поступила в редакцию 20.06.2018.

Рецензент: д-р техн. наук, Карпов Я.С.

*Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*