

ESTIMATION OF LOAD CAPACITY OF ADHESIVE JOINTS FOR TRANSPORT ENGINEERING

ОЦЕНКА НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Prof., Dr.Sc.(Eng.) Koryagin S.I., Assoc. Prof., Dr.Sc.(Eng.) Sharkov O.V., Assoc. Prof., Dr.(Eng.) Buylov S.V.,
Prof., Dr.Sc.(Eng.) Velikanov N.L., graduate Kulakov A.S.

Immanuel Kant Baltic Federal University – Russia, Kaliningrad

skoryagin@kantiana.ru, osharkov@kantiana.ru,

Abstract: Adhesive joints are widely applied in transport engineering. Crack resistance is an important parameter determining the load capacity and durability of adhesive joints. The calculation-experimental method, which allows to raise the accuracy and reliability of an estimation of the crack resistance of the adhesive compositions is proposed. The proposed method can be implemented using a test station that ensures the loading of double cantilever glued beams by equal and oppositely directed moments. The mathematical model for determining the value of crack advancing energy, includes only one independent parameter (the bending moment) was obtained. It is established that change of geometrical parameters of the proposed experimental models slightly effects (less than 3.5 %) on value of crack advancing energy.

Keywords: ADHESIVE JOINT, LOAD CAPACITY, TRANSPORT ENGINEERING, ADHESIVE JOINT, CRACK RESISTANCE, CRACK ADVANCING ENERGY, ADHESIVE COMPOSITION

1. Введение

В настоящее время клеевые соединения находят широкое применение в транспортном машиностроении для снижения массо-габаритных характеристик, увеличения нагрузочной способности, герметизации, восстановления работоспособности, а также гашение шума и вибрации [1–14].

Проведенные рядом компаний исследования подтверждают, что применение клеевых соединений позволяет в 2.0...2.5 раза снизить трудоемкость сборки и уменьшить материалоемкость конструкций до 10% по сравнению с клепкой и сваркой [11].

Например склеивание секций металлических кузовов еще не нашло широкого применения, тогда как пластмассовые кузова машин многих марок соединяют склеиванием. В связи этим разработка новых клеевых композиций с улучшенными эксплуатационными свойствами представляет определенный практический интерес [12]. Как правило, основным показателем, характеризующим, пригодность клеювого соединения при эксплуатации является его нагрузочная способность.

Нагрузочная способность конструктивных клеювых соединений определяется не столько собственной прочностью клеювых композиций, сколько возникающей в них концентрацией напряжений, за счет образования в процессе склеивания технологических дефектов: пустот; инородных включений; областей с отсутствием или слабой адгезионной связью.

При этом в клеювой слое (шве) наблюдается неоднородное напряженное состояние, образующееся в следствии различия прочностных характеристик клеювых композиций и соединяемых материалов. Окружающая среда дополнительно оказывает неравномерное разупрочняющее действие на клеювой слой.

Одной из важнейших характеристик, определяющих нагрузочную способность клеювых соединений, является их трещиностойкость.

Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные результаты исследований критериев оценки трещиностойкости клеювых соединений, это вопрос остается не полностью исследованным [3, 15–27].

Так многие полученные результаты являются несравнимыми, а некоторые недостоверными из-за некорректного планирования экспериментов, так как могут включать в себя величины, которые не обязательно являются независимыми. В результате этого величина, характеризующая работу, затрачиваемую на деформирование собственно склеиваемых деталей, может являться преобладающей.

Для оценки трещиностойкости клеювых соединений можно использовать несколько критериев: коэффициент интенсивности напряжений; коэффициент раскрытия трещины или удельную энергию продвижения трещины [28–31].

Оценка трещиностойкости с использованием коэффициентов интенсивности напряжений и раскрытия трещины требует теоретического и экспериментального анализа сложного напряженного состояния тонкого слоя клея, что представляет собой достаточно сложную задачу.

Поэтому при оценке трещиностойкости клеювых соединений обычно используют энергетический критерий – удельную энергию продвижения трещины (силу продвижения трещины).

Для повышения точности и достоверности определения удельной энергии продвижения трещины авторами разработана расчетно-экспериментальная методика.

К настоящему времени разработано значительное число методических рекомендаций и стандартов по оценке нагрузочной способности клеювых соединений при различных видах приложения нагружающих усилий, которые, с определенными допущениями, могут быть применены и для оценки их трещиностойкости [28-35].

В качестве базовой выбрана известная методика испытания клеювого соединения на трещиностойкость, заключающаяся в том, что к двухконсольному образцу прикладывают изгибающую нагрузку в виде усилий, действующих перпендикулярно консольным балкам. При этом регистрируют изменение нагрузки и соответствующее ей изменение длины образующейся в клеювом слое соединения трещины. Затем определяют удельную энергию продвижения трещины и по ней судят о нагрузочной способности [28].

При такой поставке эксперимента наблюдается существенное влияние длины растущей трещины на стабильность результатов испытаний, которое приводит к недостаточной точности полученных данных.

2. Математическая модель

Получим математическую модель, описывающую параметры трещиностойкости клеювого соединения.

Известна зависимость для определения удельной энергии продвижения трещины [30, 31]

$$G = \frac{M^2}{2b} \frac{dC}{da}, \quad (1)$$

где M – изгибающий момент; C – податливость заделки консольных балок; b – ширина консольных балок (клеявого соединения); a – длина трещины.

В предложенной расчетной схеме (рис. 1) при нагружении изгибающими моментами экспериментальный образец накапливает потенциальную энергию, которую можно определить по зависимости

$$U = \frac{1}{2} M^2 \left[\frac{a}{2E_1 J_1} + \frac{\alpha_1}{2} + \frac{k^2 a}{2E_2 J_2} + \frac{\alpha_2}{2} + \frac{(l-k)^2 (l-a)}{2(EJ)_0} \right], \quad (2)$$

где k – коэффициент, зависящий от характеристик материала и размеров консольных балок; l – длина консольных балок; E_1 , E_2 – модули упругости материала консольных балок; J_1 , J_2 – моменты инерции поперечных сечений консольных балок; α_1 , α_2 – коэффициенты податливости заделки консольных балок; $(EJ)_0$ – изгибная жесткость единицы длины экспериментального образца.

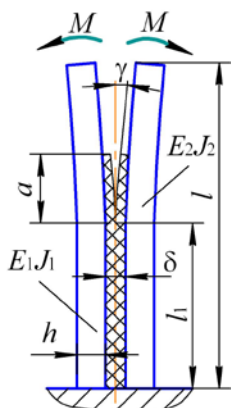


Рис. 1. Расчетная схема оценки трещиностойкости

Решая совместно зависимости (1) и (2) получим выражение для определения величины энергии продвижения трещины в виде

$$G_I = \frac{M^2}{2b} \left[\frac{1}{E_1 J_1} + \frac{k^2}{E_2 J_2} - \frac{(1-k)^2}{(EJ)_0} \right]. \quad (3)$$

Выражение (3) получено в предположении постоянства коэффициентов податливости $\alpha_1 = \alpha_2 = const$.

Для определения условий, при которых это предположение выполняется, произведены расчеты напряженно-деформированного состояния экспериментальных образцов. Полученные результаты [36, 37] показали, что напряжения, возникающие в материале балок и в клеевой композиции на расстоянии четырех толщин консоли $4h$, уменьшаются до ничтожно малых величин.

Следовательно, длина участка, в пределах которого напряженное состояние, соответствующее изгибу отдельных балок, переходит к напряженному состоянию изгиба неразрушенной части образца не превышает четырех высот консольной балки $l_1 = 4h$.

Таким образом, если в процессе испытания часть образца длиной более четырех высот балки не разрушена, то характер распределения напряжений не изменится, что обеспечит постоянство коэффициентов податливости.

Существенное достоинство выражения (3) его простота, так как оно позволяет оценивать трещиностойкость с использованием только одного независимого параметра –

изгибающего момента (M), который определяется экспериментально.

3. Экспериментальная методика

Сущность предлагаемой методики заключается в следующем. Экспериментальный образец (рис. 2) выполняют в виде двух консольно закрепленных балок 1 и 2, соединенных клеевой композицией 3.

Силы F , создающие изгибающий момент на каждой балке, прикладывают с помощью специальных нагружающих устройств 4 и 5, состоящих из блоков и гибких нитей. Концы каждой из нитей соединены с обеими консольными балками, вследствие чего нагрузка к балкам передается в виде равных и противоположно направленных моментов M (рис. 1). Нагружение экспериментальных образцов вызывает разрушение клеявого соединения, сопровождающееся образованием и ростом трещины в его плоскости.

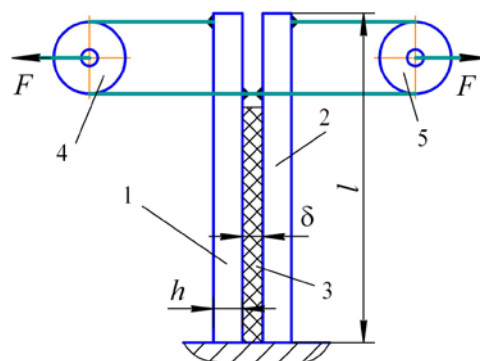


Рис. 2. Схема испытательной установки

Повышение точности в этом случае достигается за счет создания идентичных условий трещинообразования при нагружении.

4. Экспериментальные результаты

Расчетно-экспериментальная оценка характеристик трещиностойкости клеявого соединения по предлагаемой методике проводили с использованием специально разработанной экспериментальной установки (рис. 2).

В исследованиях использовали клеевые композиции нескольких типов: ВАК-А; Спрут Плюс и Спрут-5М, прочностные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1: Основные технологические характеристики клеевых композиций

Физико-химические свойства	Клеявая композиция		
	ВАК-А	Спрут-Плюс	Спрут-5М
Условная вязкость по ВЗ-246 [сек]	70...80	30...60	20...35
Температура эксплуатации [°C]	-40...+80	-60...+100	-10...+60
Прочность на воздухе [28] при:	-	-	-
равномерном отрыве [МПа]	10.8	8.5	8.4
сдвиге [МПа]	10.1	9.3	7.0
Прочность в воде [28] при:	-	-	-
равномерном отрыве [МПа]	7.7	5.1	4.6
сдвиге [МПа]	7.2	5.6	4.1
Прочность в нефтепродуктах [28] при:	-	-	-
равномерном отрыве [МПа]	8.6	7.8	6.3
сдвиге [МПа]	8.2	8.6	5.2

При проведении испытаний использовали балки прямоугольного сечения $b \times h$ изготовленные из стали Ст.3. Нагружение экспериментального образца выполняли при постоянной скорости перемещения нагружающих устройств.

Изгибающие моменты M и величины углов раскрытия трещины γ измеряли с помощью тензодатчиков типа 2ПКБ-10-100×В. Для регистрации сигнала тензодатчиков применяли регистрирующую аппаратуру – двухкоординатный графопостроитель Н306.

При определении характеристик трещиностойкости клеевых соединений обычно учитывают два переходных состояния.

Первое состояние (характеризуется величиной G_{Ic}) соответствует случаю, когда трещина делает резкий скачок. В предлагаемой методике оно наблюдается при величине максимального изгибающего момента.

Второе состояние (характеризуется величиной G_{Ia}) соответствует случаю остановки развития трещины. Данная величина определялась по величине изгибающего момента при остановке развития трещины.

Величины G_{Ic} и G_{Ia} рассчитывали по формуле (3) для соединений на основе клеевых композиций ВАК-А, Спрут Плюс и Спрут-5М.

Как показывает анализ средних значений G_{Ic} и G_{Ia} (табл. 2) наибольшая величина трещиностойкости наблюдалась для клеевой композиции ВАК-А. Поэтому дальнейшие расчеты по определению характера зависимости $G_{Ic}, G_{Ia} = f(b, h, \delta)$ проводили только для клеевой композиции ВАК-А.

Таблица 2: Зависимость энергии продвижения трещины от типа клеевой композиции

Параметры	Клеевая композиция		
	ВАК-А	Спрут-Плюс	Спрут-5М
Энергия продвижения трещины G_{Ic} [Дж/м ²]	573	465	274
Относительная величина энергии продвижения трещины G_{Ic} [%]	100	81.1	47.8
Энергия продвижения трещины G_{Ia} [Дж/м ²]	512	414	238
Относительная величина энергии продвижения трещины G_{Ia} [%]	100	80.1	46.5

Как видно из рис. 3 при диапазоне изменении ширины балки b в 2 раза (с 10 до 20 мм), а её высоты h в 3 раза (с 4 до 12 мм), наибольшее изменение величины G_{Ic} соответственно составляет всего 0,37 % и 0,65 %.

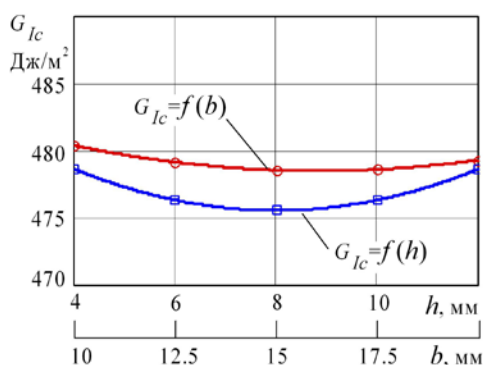


Рис. 3. Зависимость энергии продвижения трещины от размеров консольной балки в момент образования трещины

Как видно из рис. 4 при диапазоне изменении ширины балки b в 2 раза (с 10 до 20 мм), а её высоты h в 3 раза (с 4 до 12 мм), наибольшее изменение величины G_{Ia} соответственно составляет всего 0,84 и 1,24 %.

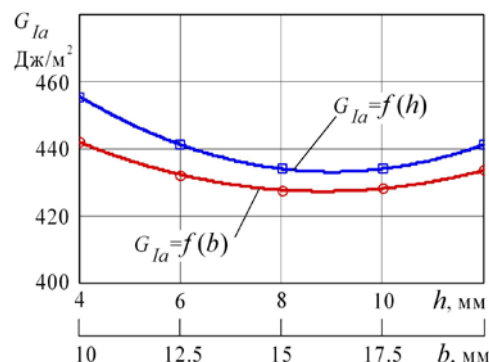


Рис. 4. Зависимость энергии продвижения трещины от размеров консольной балки в момент остановки трещины

Как видно из рис. 5 изменение толщины слоя клеевой композиции δ в 5 раз (с 0.5 до 2.5 мм) приводит к наибольшему изменению G_{Ic} и G_{Ia} соответственно на 3.37 % и 1.98 %.

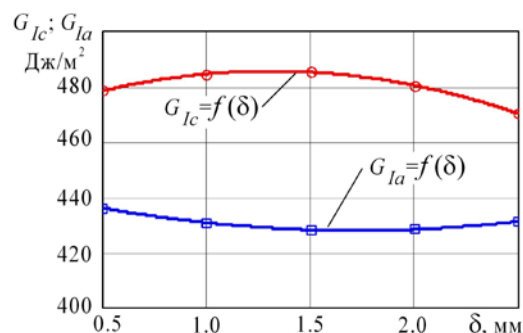


Рис. 5. Зависимость энергии продвижения трещины от толщины клеевой композиции

5. Conclusion

1. Предложена схема испытаний двойного консольного образца при которой его нагружение производится равными по величине и противоположно направленными моментами, что гарантирует идентичные условия образования трещин во всем объеме клеевой композиции.

2. Установлено, что при изменении геометрических параметров консольных балок и толщины клеевой композиции происходит незначительный разброс величины энергии продвижения трещины. Так при изменении в 2 раза размеров поперечного сечения $b \times h$ консольных балок разброс величины энергии продвижения трещины не превышает 0,37...1.24 %. При изменении в 5 раз толщины клеевой композиции δ разброс величины энергии продвижения трещины меняется в пределах 1.98...3.37 %.

3. Установлено, что покрытие на основе клеевой композиции ВАК-А имеет наибольшую трещиностойкость. Величины трещиностойкости клеевых композиций Спрут Плюс и Спрут 5М меньше на 19.9 % и 53.3 % соответственно, чем композиций на основе ВАК-А.

6. Литература

- [1] Shields J. Adhesives Handbook. London-Wellington: Elsevier, 2013. 374 p.
- [2] Gerdeen J.C., Lord H.W., Rorrer R.A.L. Engineering Design with Polymers and Composites. V.1. Boca Raton: CRC Press, 2005. 368 p.

- [3] Crococolo D. Adhesives: Mechanical properties, technologies and economic importance. New York: Nova Science Publishers Inc, 2014. 153 p.
- [4] Lees W.A. Adhesives in engineering design. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. 147 p.
- [5] Weitzenböck J.R. Adhesives in Marine Engineering. Oxford–New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2012. 218 p.
- [6] Scattina A., Roncato D., Belingardi G., Martino G. Investigation of creep phenomenon on composite material for bolt connections. *Composite Structures*, 2015. V.134. p. 378–383.
- [7] Матлин М.М., Каблов В.Ф., Кейбал Н.А. Современные клеи и клеевые соединения в транспортных средствах. Волгоград: Изд-во ВолГТУ, 2011. 111 с.
- [8] Бобович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы. Москва: МГИУ, 2009. 383 с.
- [9] Коноплин А.Ю., Баурова Н.И. Особенности применения клеевых технологий при ремонтных работах. Путь и путевое хозяйство, 2015. №6. с. 30–32.
- [10] Кудрина А.В. Клеевые и герметизирующие материалы, применяемые в авиационной промышленности и в машиностроении. Энциклопедия инженера-химика, 2014. №6. с. 28–30.
- [11] Игнатов А.В. Новые тенденции развития сборки клеевых соединений в машиностроении. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2011, № 10. с. 62–68.
- [12] Буйлов С.В., Корягин С.И., Пименов И.В., Маклахова И.С. Полимерные адгезивные материалы для производства и ремонта автомобилей. Вестник машиностроения, 2001. №1. с. 25-28.
- [13] Осипов Н.Л., Пирожков В.А., Чабунин И.С. К вопросу о прочности полимерных композитов, применяемых в автомобилестроении. Известия Московского государственного университета МАМИ, 2014. Т.1. №2(20). с. 45–47.
- [14] Терехин А.В., Русин М.Ю., Неповинных В.И., Думанский А.М. Работоспособность эластомерных клеевых соединений конструкций летательных аппаратов в условиях продолжительного теплосилового воздействия. Механика композиционных материалов и конструкций, 2015. Т.21. №4. с. 599-609.
- [15] Грабильников А.С., Ларина Н.Д. Методы определения трещиностойкости клеевых соединений. Нестандартные методы исследования структуры и свойств полимерных материалов. Москва: МАТИ, 1990. Вып. 6. 24 с.
- [16] Финогенов Г.Н. Метод испытания клеевых соединений металлов на трещиностойкость. Клеи. Герметики. Технологии, 2007, №5. с. 24–26.
- [17] Мурашов В.В. Диагностика прочности клеевых соединений. Клеи Герметики Технологии, 2008. №8. с. 20-27.
- [18] Молодницкий В.И. Методика ускоренных испытаний клеевых соединений. Технология машиностроения, 2006. №8. с. 68-70.
- [19] Финогенов Г.Н., Петрова А.П. Ресурсная прочность клеевых соединений. Клеи. Герметики. Технологии, 2005. №11. с. 29-30.
- [20] Malysheva G.V. Predicting the endurance of adhesive joints *Polymer Science. Series D*, 2014. V.7. №2. p.145-147.
- [21] Derewonko A., Godzimirski J., Kosiuczenko K., Niezgoda T., Kiczko A. Strength assessment of adhesive-bonded joints. *Computational Materials Science*, 2008. V.43. №1. p. 157-164.
- [22] Goyal V.K., Johnson E.R., Goyal V.K. Predictive strength-fracture model for composite bonded joints. *Composite Structures*, 2008. V. 82. № 3. p. 434-446.
- [23] Ávila A.F., Bueno P.O. An experimental and numerical study on adhesive joints for composites. *Composite Structures*, 2004. V. 64. № 3-4. C. 531-537.
- [24] Gift M.D.M., Selvakumar J., Alexis, S.J. Fracture studies of an adhesive joint involving composition alteration. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 2015. V. 2015-April, p. 269–273.
- [25] Chai H., Fox J. On delamination growth from channel cracks in thin-film coatings. *International Journal of Solids and Structures*, 2012. V.49. Issue 22. p. 3142–3147.
- [26] Meneghetti G., Quaresimin M., Ricotta M. Damage mechanisms in composite bonded joints under fatigue loading. *Composites Part B: Engineering*, 2012. V.43, Issue 2. p. 210–220.
- [27] Tsai M.Y., Morton J. An investigation into the stresses in double-lap adhesive joints with laminated composite adherends. *International Journal of Solids and Structures*, 2010. V.47. №24. p. 3317-3325.
- [28] Корягин С.И. Несущая способность композиционных материалов. Калининград: Янтарный сказ, 1996. 301 с.
- [29] Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 376 с.
- [30] Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1983. 296 с.
- [31] Партон В.В., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. М.: Наука, 1974. 416 с.
- [32] ISO 4587:2003. Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of high strength adhesive bonds. Geneva: ISO, 2003. 3 p.
- [33] ASTM D 5041:2012. Standard Test Method for Fracture Strength in Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Joints, USA. ASTM, 2012. 5 p.
- [34] BS 5350-C7:1990. Methods of test for adhesives. Adhesively bonded joints: mechanical tests. Determination of creep and resistance to sustained application of force, London: BSI, 1990. 3 p.
- [35] DIN EN 15337:2011. Testing of adhesives for metals and adhesively bonded metal joints; compression shear test, Berlin: DIN. 2 p.
- [36] Буйлов С.В., Корягин С.И., Ляшенко Б.А. Исследование трещиностойкости клеевых соединений. Проблемы прочности, 1987. №3. с. 52-56.
- [37] Буйлов С.В., Корягин С.И. Метод определения трещиностойкости клеевых соединений. Заводская лаборатория, 1988. Т.54. №4. с.81-83