

УДК 539.612

А.А. Мокина**A.A. Mokina**Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

ОСНОВЫ АДГЕЗИИ ПОЛИМЕРОВ**FUNDAMENTALS OF ADHESION OF POLYMERS**

Рассмотрены основные методы измерения адгезии полимеров. Учтено влияние адгезионного слоя на микроструктурные свойства композиционного материала на основе полимерной матрицы, армированной стекловолокном. Проведен расчет полей напряжений в межфазном слое.

Ключевые слова: адгезия, адгезионный контакт, прочностные показатели, субстрат, адгезив, межфазный слой.

Basic methods of measurement of adhesion of polymers are considered. The influence of adhesive layer on microstructural properties of composite material based on a polymer matrix, reinforced with fiberglass is taking into consideration. The calculation of stress fields in the interphase layer is done.

Keywords: adhesion, adhesive contact, strength indices, substratum, adhesive, interphase layer.

Вопросы применения клеев, нанесения полимерных покрытий, получения многослойных изделий на основе полимеров в литературе освещены достаточно широко. Несмотря на это, большой экспериментальный материал, накопившийся в различных областях техники, до настоящего времени не обобщен и не систематизирован с целью формулирования основных закономерностей адгезии полимеров к субстратам различной природы [1].

Адгезия – молекулярная связь, возникающая между поверхностями разнородных тел, приведенных в контакт [2]. Удельная сила, или удельная работа, разрушения адгезионной связи является количественной характеристикой прочности адгезионного соединения. Следовательно, об адгезии можно судить по работе, затраченной на разрыв адгезионного соединения [3–5].

Характеристикой адгезии в какой-то степени могут служить прочностные показатели, например: сопротивление раздиру и разрыву наполненных вулканизатов каучуков, предел прочности стеклопластиков при изгибе и растяжении, сопротивление разрыву клееных нетканых материалов. Субстратами в этих системах, именуемых адгезионными, являются частицы порошкообразного наполнителя (мел, сажа, стекло), стеклянные и текстильные волокна, пленки полимеров [4–5].

Адгезия представляет собой крайне сложное явление, с чем связано существование множества теорий, которые объясняют это явление с различных позиций.

Механическая теория рассматривает адгезию как результат проявления сил межмолекулярного взаимодействия между контактирующими молекулами адгезива и субстрата, электронная теория – как результат молекулярного взаимодействия поверхностей, различных по своей природе. Диффузионная теория сводит данное явление к взаимной или односторонней диффузии молекул адгезива и субстрата. Химическая теория объясняет адгезию не физическим, а химическим взаимодействием.

Методы измерения адгезии основаны на определении приложенного внешнего усилия, под действием которого в адгезионном соединении возникают нормальные и тангенциальные напряжения, приводящие к разрушению соединения. Эти методы испытаний можно классифицировать по способу нарушения адгезионной связи: неравномерный отрыв, равномерный отрыв и сдвиг. Разрушающие методы могут быть статическими и динамическими. В зависимости от метода испытания за меру адгезии могут быть приняты сила, энергия или время. Для динамических методов показателем прочности адгезионного соединения служит число циклов нагружения до разрушения [1].

Любая система «адгезив – субстрат» характеризуется не только величиной адгезии, но и типом нарушения связи между компонентами, т.е. характером разрушения. Общепринятой является следующая классификация видов разрушений: адгезионное (адгезив целиком отделяется от субстрата), когезионное (разрыв происходит по массиву адгезива или субстрата), смешанное (происходит частичное отделение адгезива от субстрата, частичное разрушение субстрата и частичное разрушение адгезива) [1].

Был проведен расчет полей напряжений однонаправленного стеклопластика с различной толщиной межфазного слоя.

Для определения полей напряжений рассмотрим периодическую задачу теории упругости для неоднородных сред матричного типа с регулярной структурой. Пусть $\vec{a}$ – вектор трансляции, смещением на который ячейки периодичности можно синтезировать структуру среды. Систему уравнений запишем в виде [6]

$$\sigma_{ij,j}(\vec{r}) = 0, \quad (1)$$

где $\sigma_{ij,j}()$ – структурные напряжения, которые в отсутствии массовых сил находятся в равновесии;

$$\sigma_{ij,j}(\vec{r}) = \lambda(\vec{r}) \varepsilon_{aa}(\vec{r}) \delta_{ij} + 2\mu(\vec{r}) \varepsilon_{ij}(\vec{r}), \quad (2)$$

где $\lambda(\vec{r})$ и $\mu(\vec{r})$ – постоянные Ляме, ε_{ij} – структурные деформации, δ_{ij} – символ Кронекера, а тензор структурных деформаций связан с вектором структурных перемещений (u) соотношением Коши:

$$\varepsilon_{ij}(\bar{r}) = [u_{i,j}(\bar{r}) + u_{j,i}(\bar{r})], \quad (3)$$

причем постоянные Ляме $\lambda(\bar{r})$ и $\mu(\bar{r})$ в физических уравнениях являются кусочно-однородными периодическими функциями. Условия периодичности для искомых полей деформирования:

$$\varepsilon_{ij}(\bar{r}) = \varepsilon_{ij}(\bar{r} + \bar{a}), \quad \sigma_{ij}(\bar{r}) = \sigma_{ij}(\bar{r} + \bar{a}); \quad (4)$$

заданные макронапряжения:

$$\sigma_{ij}^* = S_{ij}, \quad (5)$$

т.е.

$$\frac{1}{v_1} \int \sigma_{ij}(\bar{r}) d\bar{r} = S_{ij}, \quad (6)$$

где v_1 – объем ячейки периодичности; S_{ij} – тензор модуля податливости, который позволяет выделить единственное решение системы. Определив напряжения и деформации во всех точках объема v_1 , ячейки периодичности, соответствующие заданным макронапряжениям, можно вычислить и макроскопические модули упругости среды.

Рассмотрим однонаправленный волокнистый композиционный материал с тетрагональной укладкой круглых стеклянных волокон в эпоксидной матрице. Будем рассчитывать поля напряжений с учетом межфазного слоя. Волокна, матрица и межфазный слой являются упругими и изотропными. Свойства изотропных стеклянных волокон следующие: $E = 1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,21$. Свойства изотропной эпоксидной матрицы ЭДТ-10: $E = 2,91 \cdot 10^9$ Па, $\nu = 0,356$. Свойства межфазного слоя: $E = 5,4 \cdot 10^9$ Па, $\nu = 0,34$.

Рассмотрим всестороннее растяжение. Граничные условия заданы в перемещениях $u_x = 0,01a$, $u_y = 0,01a$, где a – характерный размер длины ячейки периодичности. Объемная доля волокон – 0,5, толщина межфазного слоя (R_i) – $0,025R_f$, где R_f – радиус волокна, равный $25 \cdot 10^{-6}$ м. Строим геометрию, выбирая свойства материалов и задавая их характеристики (рис. 1). Далее разбиваем конструкцию на конечные элементы (рис. 2). В итоге получаем поля напряжений σ_x (рис. 3) и σ_y (рис. 4). Поля напряжений являются неоднородными. Максимальные напряжения сосредоточены в волокне и вблизи межфазного слоя: $\sigma_x = 70,5$ МПа, $\sigma_y = 70,4$ МПа.

Чтобы рассмотреть влияние межфазного слоя на напряжения в материале, увеличим толщину межфазного слоя до $0,01R_f$. Выполним все действия, как и для предыдущего образца. Строим геометрию, выбирая свойства материалов и задавая их характеристики (рис. 5). Разбиваем конструкцию на конечные элементы (рис. 6). Получаем напряжения σ_x (рис. 7) и σ_y (рис. 8).

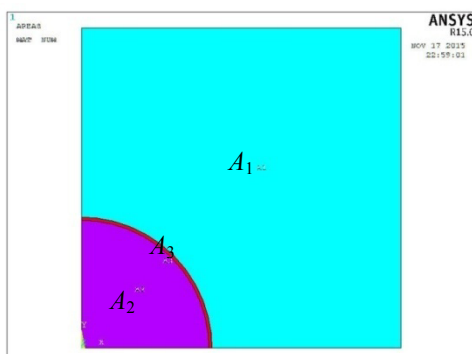


Рис. 1. Образец, состоящий из 3 компонентов: A_1 – изотропная эпоксидная матрица; A_2 – изотропные стеклянные волокна; A_3 – межфазный слой

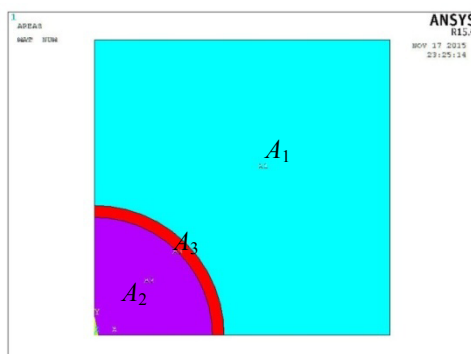


Рис. 4. Образец с увеличенной толщиной межфазного слоя до $0,01R_f$, состоящий из 3 компонентов: A_1 – изотропная эпоксидная матрица; A_2 – изотропные стеклянные волокна; A_3 – межфазный слой

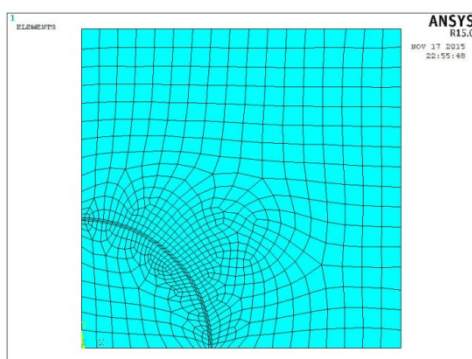


Рис. 2. Образец, разделенный на конечные элементы

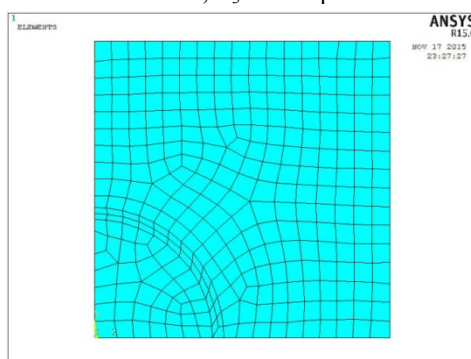


Рис. 5. Образец с увеличенной толщиной межфазного слоя до $0,01R_f$, разделенный на конечные элементы

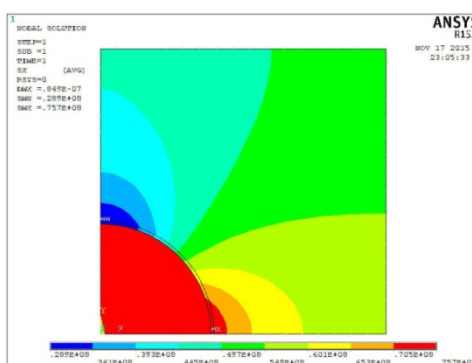


Рис. 3. Поля напряжений σ_x

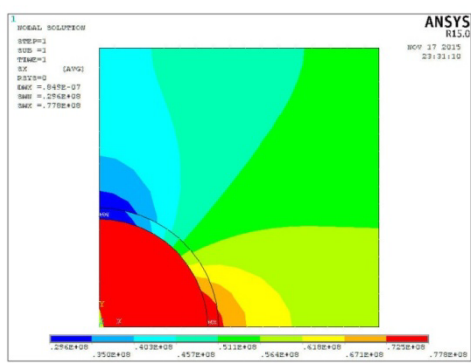
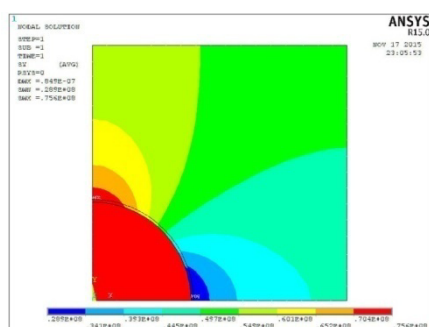
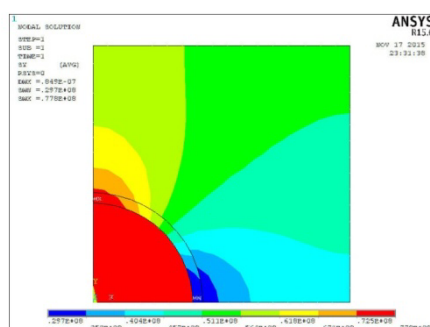


Рис. 6. Поля напряжений σ_x для образца с увеличенным межфазным слоем до $0,01R_f$

Рис. 7. Поля напряжений σ_y Рис. 8. Поля напряжений σ_y для образца с увеличенным межфазным слоем до $0,01R_f$

Сделаем следующие выводы:

1. Напряжения в материале распределены неравномерно.
2. Напряжения достигают максимальных значений в волокне и вблизи межфазной поверхности.
3. Напряжения матрицы значительно ниже, чем в волокне.
4. С увеличением толщины межфазного слоя максимальные напряжения увеличились на 2,75 %.

Список литературы

1. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. – М.: Химия, 1969.
2. Краткая химическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1961.
3. Адгезия (клеи, цементы, припои): сб. / под ред. Н. Дебройна и Р. Гурвинка. – М.: Издательство, 1954.
4. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин [и др.]. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
5. Полимерные композиционные материалы / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 352 с.
6. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 116 с.

Получено 07.12.2015

Мокина Анна Алексеевна – бакалавр, аэрокосмический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: mokina.anyuta@yandex.ru.

Научный руководитель – **Шайдурова Галина Ивановна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций», аэрокосмический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, главный химик ПАО «НПО «Искра», e-mail: sgi615@iskra.perm.ru.