

УДК 620.179.18

**АДГЕЗИЯ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ: ТЕРМИНЫ И ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ***В. П. Кузнецов, М. И. Баумгартэн, Б. П. Невзоров, Ю. А. Фадеев***ADHESION IN COMPOSITE MATERIALS: TERMS AND PHYSICAL FOUNDATIONS***V. P. Kuznetsov, M. I. Baumgarten, B. P. Nevzorov, Yu. A. Fadeev*

Данный обзор посвящен такому понятию, как адгезия. Разнообразие, в котором присутствует это явление, а также множество теорий, описывающих его, порождает некую неопределенность его дефиниции и в конечном итоге его понимания. Понимание сущности адгезии представляет определенный интерес, особенно при контроле прочностных характеристик композиционных материалов. Приводится ряд определений, применяемых в научной литературе, которые позволяют выделить три группы дефиниций. Первое – адгезия как свойство, второе – адгезия как процесс, и третье – адгезия как состояние. Рассмотрение различных подходов и теорий показало, что для композиционных материалов существует единый предмет в определениях адгезии – межфазная граница контактирующих термодинамических фаз. Делается вывод об отсутствии на данный момент четкого определения понятия «адгезия».

This review is devoted to such a concept as adhesion. The diversity, in which this phenomenon exists, and many theories describing it create some uncertainty in its definition and, ultimately, its understanding. Understanding of adhesion is of particular interest, especially under the control of strength characteristics of the composite materials. A number of definitions used in the scientific literature is provided, which allows to distinguish three groups of definitions. The first define adhesion as a property, the second define adhesion a process, and the third define adhesion as a condition. Considering different approaches and theories showed that for composite materials there is a common thing in the definitions of adhesion – the interphase boundary between contacting thermodynamic phases. Thus, the authors conclude that there is currently no clear definition of "adhesion".

**Ключевые слова:** композиционные материалы, адгезия, неразрушающий контроль.

**Keywords:** composite materials, adhesion, non-destructive testing.

Важнейшую, а зачастую и определяющую роль в развитии цивилизации и жизни людей играют материалы. Они настолько важны, что даже названия эпох в языках человечества отображают используемые человеком материалы: каменный век, бронзовый век, железный век. Сегодня область созданных и используемых материалов чрезвычайно разнообразна. Она объединяет материалы, используемые в быту и в технике, в космосе и вооружении, медицине и науке. Особенно большое количество разнообразных материалов используется в авиации, космонавтике, энергетике и военной технике. Среди этих материалов особое место занимают композиционные материалы, без которых немислима современная жизнедеятельность человека. Поэтому современную эпоху без ложной скромности можно назвать веком композиционных материалов.

С глубокой древности человек, подражая природе, создавал новые материалы. И первым (быть может) композиционным материалом был кирпич, изготовленный из глины и соломы. Такой кирпич не рассыпался даже без обжига. Другой композиционный материал – папирусные суда, результат объединения папируса и битума. Знаменитый древний композиционный материал булат, продукт искусного соединения тончайших нитей (слоев) высокоуглеродистой стали и мягкого железа. Бетон – это строительный композиционный материал, представляющий из себя щебень, скрепленный связующим. Прочность бетона определяется не прочностью щебня, а прочностью соединения щебня. Бетон явился родоначальником железобетона (бетон, армированный стальной арматурой) и других композиций на его основе. Сегодня бетон ар-

мируют стеклопластиковыми (композиционными) стержнями, что позволяет снизить вес и создать еще более ажурные строительные конструкции из бетона. Другой, не менее важный композиционный материал в строительстве, это гнуто клееные деревянные балки (конструкции), позволяющие увеличить длину пролета между опорами с 6 метров до 24, а иногда и до 30 метров. При этом такие балки устойчивы к гниению, горению и другим неблагоприятным воздействиям; их срок службы возрастает в десятки раз по сравнению с цельными деревянными балками при полном сохранении эстетического вида и структуры древесины. Чрезвычайно прочными и легкими оказались конструкции из стекло- и углепластика, навитого из нитей, пропитанных эпоксидными полимерами. Сегодня из этих материалов конструируют спортивный инвентарь, одним из которых является гоночный велосипед весом 2,4 килограмма в собранном виде. Эта технология оказалась настолько прогрессивной, что позволяет изготавливать изделия, минуя стадию изготовления материалов. При такой технологии отходы исчезают. По такой же аналогии создаются алюминиевые и керамические композиты, представляющие из себя навитые высокопрочные и жаростойкие сплавы, залитые алюминием или керамическим связующим [4; 10; 12]. Другой класс композиционных материалов представлен изделиями, где слои композиционных материалов склеены между собой, имеющие разные, но специально подобранные механические свойства. В таких изделиях основой является жесткий слой, навитый из волокон стеклопластика или высокопрочных сплавов и выполняющих роль защитного, формообразующего каркаса изделия [4]. В

последнее время исследуются саморастущие кристаллические структуры, склеенные в единую массу полимерным клеем (цементы с добавками водорастворимых клеев), композиции из термопласта с короткими армирующими волокнами [10]. Перспективным направлением в создании композитов стало создание интеллектуальных композиционных материалов, обладающих отрицательными коэффициентами преломления электромагнитных или акустических волн, что делает их одеждой объектов невидимок, позволяет существенно увеличить разрешающую способность приборов, основанных на этих материалах, и позволяет решать большой класс прикладных задач [5].

Во всех вышеприведенных примерах можно выделить общее для композиционных материалов, а именно: все эти материалы являются результатом объемного сочетания двух и более материалов на основе адгезионных соединений, геометрическое расположение которых имеет большое значение для решения технических задач. В них объединяют в едином объеме разнородные материалы, обладающие, как правило, противоположными свойствами (пластичность и хрупкость, жесткость и эластичность, проводники и диэлектрики и т. д.). Для формулирования более строгой классификации композиционных материалов, опираясь на приведенные примеры и многочисленные научные работы [4; 10; 12], необходимо выделить следующие обязательные признаки:

- композиционный материал в своем объеме имеет большое количество границ раздела между двумя и более разнородными материалами;

- границы раздела между разнородными материалами образуются адгезией, величина и характер которой определяют новые свойства композиционного материала;

- композиционный материал образуется объемным сочетанием разнородных материалов и приобретает от их сочетания новые свойства, которых нет ни у одного материала из входящих в его состав в отдельности.

Следует подчеркнуть, что именно совместный учет сочетания свойств разнородных материалов и процессов, протекающих на границе их раздела, создает композиционные материалы. Например, пренебрежение процессами, протекающими на границе раздела приводит:

- к отсутствию адгезии или малой адгезии, которая снижает прочность композита, запроектированного разработчиком, и не позволяет достичь желаемого результата при конструировании композиционного материала;

- к появлению инородных включений (газовые выделения или загрязнения), создающих переходную зону с малой адгезией;

- к возникновению механических напряжений, центрами которых являются границы раздела, при изменениях связующего компонента: полимеризации, сушке, твердении, что также ослабляет адгезию, а в отдельных случаях и полностью разрушает ее, что негативно сказывается на новых свойствах композиционных материалов.

Неучет граничных явлений в композиционных материалах является причиной появления технологических и эксплуатационных дефектов. В ходе создания конструкций из таких материалов возможно появление непроклеев, расслоений и т. п. Также при эксплуатации изделий возникает накопление рассеянных повреждений, которые приводят к снижению прочностных характеристик. Ударные взаимодействия со сторонними телами ускоряют появление и развитие этих дефектов на границах в местах слабой адгезии, что может привести к ухудшению функциональных качеств или разрушению конструкции в целом [4; 10; 12]. Противоречивый характер экспериментальных исследований процессов разрушения таких материалов и оценки характеристик трещиностойкости при нагружении быстро нарастающей нагрузкой сдерживают разработку норм дефектности конструкций из композитов.

Подводя итог выше сказанному, следует заметить, что контроль над процессами, протекающими на границе раздела фаз или за адгезией композиционных материалов чрезвычайно актуален. В то же время этот контроль следует осуществлять как в процессе изготовления композиционного материала, так и в процессе его эксплуатации. Контроль для особо ответственных изделий является важным технологическим элементом, позволяющим изготавливать, эксплуатировать и хранить качественные и надежные изделия, а зачастую существенно усовершенствовать и саму технологию изготовления композиционных материалов, и способствует появлению новых материалов с лучшими производственными показателями. Из рассмотренного выше материала следует, что «адгезия» или граничные условия определяют свойства композиционных материалов.

Бессмысленно рассматривать методы контроля адгезии, не уточнив само понятие «адгезия». Прежде всего, укажем на синонимы: приклеивание, прилипание, склеивание, слипание, сцепление, которые ассоциируются с понятием адгезия во многих словарях. Из анализа обширной литературы можно установить следующее.

1. В зависимости от рассматриваемой области знания определения различны: в физике, химии, биологии и т. д.

2. Физическая сущность адгезии различна в различных теориях (адсорбционной, механической, электрической, электронной, диффузионной, химической).

3. Широкий круг явлений, где наблюдается адгезия: склеивание, пайка, сварка, нанесение покрытий и т. п.

4. Разнообразны эффекты, наблюдаемые при адгезии: капиллярность, смачиваемость, несмачиваемость, поверхностное натяжение, мениск жидкости в узком капилляре и др.

5. В зависимости от субстрата (твердая поверхность) и адгезива (прилипшее тело) это явление может называться либо адгезией (разнородные тела), либо когезией (в однородном теле), либо аутогезией (однородные тела).

6. Адгезия как таковая может быть между Т – Т, Т – Ж, Т – Пл, Ж – Ж, Ж – Пл, Т – П, Ж – П, П – П, где Т – твердое тело, Ж – жидкость, Пл – пленка, П – порошок.

На данный момент адгезию описывают с позиций пяти теорий: теория диффузии, теория адсорбции, механическая теория, электрическая и теория слабого граничного слоя [2; 9; 13]. В этих теориях адгезию определяют по-разному, иногда противоречиво. Рассматривая первоисточники [1; 2; 6 – 9; 11; 17; 19], видим, что они определяют адгезию в основном тремя способами. Рассмотрим определения, приведенные в наиболее цитируемой научной литературе. На первом месте по количеству цитирований находится **адгезия как свойство веществ**; на втором месте – **адгезия как процесс** (или явление); и на третьем месте – **адгезия как состояние, которое уже возникло**. Приведем примеры в виде определений, которые даны адгезии в наиболее авторитетных научных первоисточниках.

1. В своих работах А. А. Берлин и В. Е. Басин дают следующее определение «Под адгезией понимают молекулярную связь между поверхностями приведенных в контакт **разнородных тел**» [2; 17]. А. Д. Зимон определяет: «Под адгезией жидкости подразумевают взаимодействие **жидкой и твердой фаз** на границе раздела этих фаз» [8]. С. С. Воюцкий определяет ее как «Адгезия, прилипание... – связь между приведенными в контакт **разнородными поверхностями**» [6]. Все исследователи граничных явлений указывали на проблему трактовки и пытались ее решить. Так, например Б. В. Дерягин устраняет эту проблему разделением процесса и свойства и определил адгезию как: «Общепринято под адгезией подразумевать **сопротивление нарушению контакта двух разнородных тел**. Поэтому явления адгезии естественно относить к поверхностным явлениям, контролируемым поверхностными силами. Для устранения двусмысленности было бы целесообразно термин «прилипание» относить к процессам установления и прогрессивного роста со временем молекулярной связи между двумя телами, термин же «адгезия» применять для обозначения достигнутой прочности этой связи. Таким образом, прилипание в согласии с этимологической основой слова должно обозначать процесс, а адгезия – количественную меру его результата» [7; 13]. За рубежом понятие об адгезии претерпевает аналогичные изменения: так, например, в работах С. Wake [19], Л. Х. Ли [11] и А. Адамсона [1], стремясь ограничить многозначность термина, предлагали в узком смысле «под адгезией понимать прочность связи двух соприкасающихся фаз».

2. П. А. Ребиндер определяет адгезию как прилипание: «Адгезия (прилипание) – возникновение связи между **поверхностными слоями двух разнородных (твердых или жидких) тел (фаз), приведенных в соприкосновение**» [17]. Похожее на это определение (адгезия как явление) определили В. Л. Вакула и Л. М. Притыкин: «**закрывающееся в возникновении физического и/или химического взаимодействия между конденсированными фазами при их молекулярном контакте, приводящее к образованию новой гетерогенной системы**» [3]. У них же «Адгезия – явление соединения приведенных в контакт **поверхностей конденсированных фаз**» [14; 15]. Видно, что здесь сближение двух конденсированных фаз на расстояние действия межмолекулярных сил трактуют как адге-

зию, в результате чего возникает связь между разнородными конденсированными фазами.

3. «Адгезия – такое состояние двух разнородных тел, при котором они удерживаются вместе в тесном межфазном контакте таким образом, что механическая сила или работа могут быть переданы через границу раздела» – так определил адгезию Ву Шоухенг [20]. Под состоянием автор описывает наличие межфазного контакта и данное определение, по сути, возвращает нас к граничным состояниям.

Кроме приведенных трех групп можно найти другие определения, цитирование которых весьма мало численно и вряд ли приведет к нахождению правильного определения. Поэтому постараемся разобраться с этими тремя классами определений адгезии.

В этих определениях и других, которые не упомянуты в этой работе, объектом является гетерогенное тело. Это тело имеет две разные фазы, при этом фазы связаны межмолекулярными силами на границе их раздела и обязательно создает третью фазу – границу, которая имеет отличные физико-механические свойства, так как образована смесью структурных единиц. Еще раз подчеркнем, что в первой группе определений подчеркивается наличие связи, во второй группе определений упор делается на процессе возникновения связи или переходе системы в связанное состояние, и в третьем определяется состояние (есть связь, нет связи) и при этом процесс игнорируется.

И все же проблемы остались, например: как быть с множеством теорий, объясняющих механизм адгезии? Действительно ли, что «адгезия» не может быть описана одной теорией? Можно ли предположить, что число адгезионных теорий может значительно сократиться? и т. д.

Если же в определении адгезии заменить понятие «разнородные тела» на «термодинамические фазы», как это делают Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц в своей работе [16], то некоторые теории, числящиеся по классу адгезионных, выпадут из круга адгезионных проблем. Первым, кто предпринял попытки объединить эти теории, был К. В. Аллен [18] в 1969 г., но его усилия не нашли широкого отклика. Мы можем попытаться также объединить эти теории, исходя из рассмотренных определений адгезии, и можно утверждать, что единый предмет в определениях адгезии существует – это межфазная граница контактирующих термодинамических фаз. Именно об этом мы говорили при рассмотрении композиционных материалов. Для описания межфазной границы существует термодинамический подход [16]. Ее также можно описать теориями на основе сил Ван-дер-Ваальса или на основе потенциала Ленарда-Джонса, или теорией Лившица, рассматривающей излучаемые телами электромагнитные волны. Эти теории достаточно подробно изложены в ряде монографий, например, в [1]. Другие же теории (механическая и теория слабого граничного слоя) уместно рассматривать в качестве поправок, учитывающих отклонения от идеальной адгезии или ими пренебречь.

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что все граничные явления характеризуются адгезией. Адгезия – это процесс энергетического взаимодействия структурных частей (атомов, молекул) на границе

соприкасающихся веществ (субстратов и адгезивов), что образует приграничный слой (толщиной в две и более структурные единицы), приводящий к появлению нового объекта композиционного материала, характеризующего новыми свойствами. *(Структурные единицы создают между собой комбинации энергетических уровней, по крайней мере, три: субстрат-субстрат, адгезив-адгезив, субстрат-адгезив, что является первоисточником напряженного состояния между структурными единицами, перерастающее в макронапряжения композиционных материалов).*

Вместе с тем, как отмечают авторы [21], “так как приоритет использования клеевых соединений при-

надлежит природе, видимо, это – основная причина того, что до настоящего времени нет единой теории (адгезии) склеивания, а ее познание, как и самой природы, возможно, является бесконечным процессом”.

Таким образом, мы не имеем четкого терминологического определения «адгезии». К тому же следует отметить, что современная лингвистика [22; 23] не имеет однозначного представления о данном термине вообще. Для одних непременным свойством термина является его однозначность, для других нечеткости языковых понятий не доказывают многозначность термина.

### Литература

1. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей: пер. с англ. / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
2. Берлин, А. А. Основы адгезии полимеров / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – М.: Химия, 1974. – 392 с.
3. Вакула, В. Л. Физическая химия адгезии полимеров / В. Л. Вакула, Л. М. Притыкин. – М.: Химия, 1984. – 224 с.
4. Васильев, В. В. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
5. Веселаго, В. Г. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления / В. Г. Веселаго // УФН. – 2003. – № 7. – С. 790 – 794.
6. Воюцкий, С. С. Адгезия / Энциклопедия полимеров. – М.: Сов. энциклопедия, 1972. – Т. 1. – С. 22 – 29.
7. Дерягин, Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
8. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.
9. Краткая химическая энциклопедия. – М.: Сов. Энциклопедия, 1961. – Т. 1. – 1263 с.
10. Леонов, В. В. Материаловедение и технология композиционных материалов: курс лекций / В. В. Леонов, О. А. Артемьева, Е. Д. Кравцова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. – 241 с.
11. Ли, Л. Х. Адгезивы и адгезионные соединения: пер. с англ. / под ред. Л. Х. Ли. – М.: Мир, 1988. – 226 с.
12. Любин, Дж. Термины и определения / Дж. Любин // Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. – М.: Машиностроение, 1988. – Т. 1. – 448 с.
13. Ненахов, С. А. Адгезия. Основные термины и определения / С. А. Ненахов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2007. – № 4. – С. 2 – 6.
14. Притыкин, Л. М. Мономерные клеи / Л. М. Притыкин, Д. А. Кардашов, В. Л. Вакула. – М.: Химия, 1988. – 176 с.
15. Притыкин, Л. М. Адгезия / Л. М. Притыкин, В. Л. Вакула // Химическая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – Т. 1. – С. 35 – 38.
16. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред. – Т. VIII / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 624 с. – (Серия: Теоретическая физика).
17. Физический энциклопедический словарь // Сов. энциклопедия. – М., 1960. – Т. 1. – С. 621.
18. Allen, K. W. In Aspects of Adhesion / K. W. Allen // D. J. Alner, Ed. – London: Univ. of London Press. – 1969. – V. 5. – P. 11.
19. Wake, W. C. Adhesion and Formulation of Adhesives / W. C. Wake. – London: Applied Science Publishers, 1982. – P. 3.
20. Wu Souheng. Polymer Interface and Adhesion / New York and Bael // Marcel Dekker, Inc., 1982. – P. 337.
21. Башкирцев, В. И. Научные представления об адгезии / В. И. Башкирцев, Л. А. Юдицкий // Статья в журнале № 3(30), 2012, 14-ФГУП Информрегистр № 0421200058/0052.
22. Мартемьянова, М. А. Особенности формирования современных научных терминологических систем (на примере терминов нанотехнологий): автореф. ... канд. филол. наук / М. А. Мартемьянова. – Ижевск, 2012.
23. Алиева, П. М. Состояние лингвистической терминологии в современном русском языке (2001 – 2011): дис. ... канд. филол. наук / П. М. Алиева. – Магас, 2011.

### Информация об авторах:

**Кузнецов Владимир Петрович** – кандидат технических наук, ведущий специалист ООО “НТК «Экология», Кемерово, Россия, +7 905 068 5757, [vpk-51@mail.ru](mailto:vpk-51@mail.ru).

**Vladimir P. Kuznetsov** – Candidate of Technical Sciences, Leadin specialist at ООО “STC “Ecology”, Kemerovo.

**Баумгартэн Михаил Ицкович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры философии Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия, +7-904-375-52-62.

**Mikhail I. Baumgarten** – Candidate of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Philosophy, Gorbachev Kuzbass State Technical University.

**Невзоров Борис Павлович** – доктор педагогических наук, профессор кафедры современного естествознания КемГУ, 8 (384-2) 58-13-01.

**Boris P. Nevzorov** – Doctor of Pedagogics, Professor, Head of the Department of Modern Natural Science, Kemerovo State University.

**Фадеев Юрий Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия, 8 (384-2) 39-63-18.

**Yuriy A. Fadeev** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Mathematics, Gorbachev Kuzbass State Technical University.

*Статья поступила в редколлегию 10.04.2014 г.*