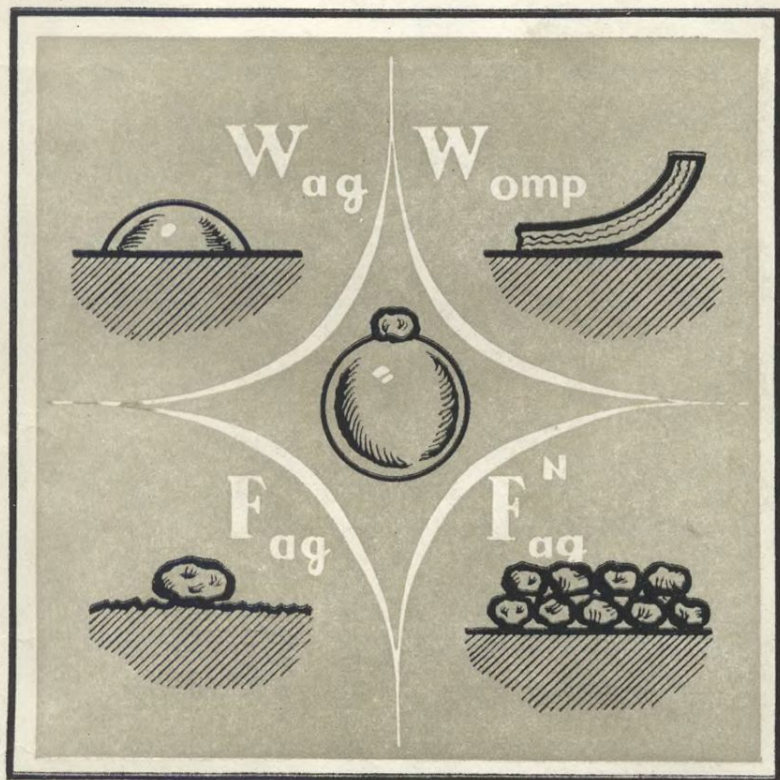


А. Д. ЗИМОН
ЧТО ТАКОЕ
АДГЕЗИЯ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Серия «Наука и технический прогресс»

А. Д. ЗИМОН

ЧТО ТАКОЕ АДГЕЗИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1983

Н—П З и м о н А. Д. **Что такое адгезия.** М.: Наука, 1983. 176 с.

3—62 Явление адгезии, в обиходе называемое прилипанием, встречается всюду: на Земле и в Космосе, в атмосфере и гидросфере, в различных отраслях промышленности и сельскохозяйственного производства. Книга повествует об адгезии, раскрывая ее причины и следствия, положительные и отрицательные свойства, многочисленные аспекты практического применения. Автор впервые комплексно рассматривает три формы адгезии: частиц, жидкости и пленок.

Книга предназначена для широкого круга читателей, интересующихся современными проблемами естествознания.

18.5

Анатолий Давыдович Зимон

ЧТО ТАКОЕ АДГЕЗИЯ

Серия «Наука и технический прогресс»

Утверждено к печати редколлегией «Научно-популярная литература» Академии наук СССР

Редактор А. М. Цукерман. Редактор издательства И. Д. Казаринова
Художественный редактор Н. А. Фильчагина
Технические редакторы Р. Г. Грузинова, А. М. Сатарова
Корректоры Н. С. Биргер, И. А. Талалай

ИБ № 24572

Сдано в набор 06.12.82. Подписано к печати 15.03.83. Т-06117. Формат 84×108¹/₃₂
Бумага книжно-журнальная. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр. отт. 9,56. Уч.-изд. л. 9,6. Тираж 16 200 экз.
Тип. зак. 2328. Цена 65 коп.

Издательство «Наука» 117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90
2-я типография издательства «Наука» 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

З $\frac{1805000000-179}{042(02)-83}$ 167-83-II

© Издательство «Наука»,
1983 г.

ОТ АВТОРА

Есть явления, которые кажутся обыденными и давно известными, а между тем они самым непосредственным образом определяют прогресс в различных областях жизни и деятельности человека. К их числу относится адгезия.

Рассказывать об адгезии просто и сложно. Просто — поскольку адгезия всюду; сложность — в ее многогранности, фундаментальности основополагающих представлений и связи адгезии с многочисленными сопутствующими процессами.

Автор поставил задачу не только познакомить читателя с адгезией, но и системно изложить материал с учетом различных видов адгезии, методов количественной оценки этого явления, причин и следствий адгезии с тем, чтобы на основе этого материала показать многочисленные практические аспекты, обуславливающие научно-технический прогресс.

С адгезией сталкиваются все: одни — по роду своей профессиональной деятельности, другие — в обиходе, третьи — в процессе изучения. Адгезия интересует многих. Автор надеется, что книга будет полезна широкому кругу читателей. Неспециалист не только всесторонне познакомится с адгезией, но и более полно уяснит ее значение и сферу действия. Специалисту книга может помочь систематизировать свои знания по адгезии и воспользоваться для решения конкретных задач тем подходом, который дается в книге для раскрытия ее существа.

Книга родилась в бесконечных сомнениях, неудачах, поисках и находках. Неоценимую помощь в процессе работы над книгой оказали те, кто прочитал ее в рукописи и чья доброжелательная критика помогла автору. В связи с этим автор с благодарностью вспоминает Ф. Д. Овчаренко, Е. Я. Бесидовского, В. А. Гусева, А. С. Гродского, Б. В. Железного, В. В. Иванова, И. Н. Путилову, М. С. Смирнова, Н. Б. Урьева, В. Н. Фросина, Ю. Г. Фролова, А. М. Цукермана и приносит особую благодарность своему учителю и наставнику Б. В. Дерягину, предопределившему научный и жизненный путь автора, а также Г. И. Фуксу за постоянное внимание к работе.

За оформление рисунков и техническую помощь выражаю признательность В. П. Субботиной, с которой автора связывает двадцатипятилетнее творческое содружество.

В процессе многочисленных переработок рукописи, когда порой казалось, что им нет конца, моральная поддержка и реальная помощь, как всегда, были оказаны А. А. Зимон.

Насколько удалось автору увлечь читателя и подробно познакомить его с адгезией, может решить только сам читатель, все замечания которого будут восприняты с признательностью.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
- Басин В. Е. Адгезионная прочность. М.: Химия, 1981. 192 с.
- Берлин А. А., Басин В. Е. Основы адгезии полимеров. 2-е изд. М.: Химия, 1974. 391 с.
- Воюцкий С. С. Аутогезия и адгезия высокополимеров. М.: Ростехиздат, 1960. 244 с.
- Гуль В. Е. Структура и прочность полимеров. 3-е изд. М.: Химия, 1978. 328 с.
- Дерягин Б. В. Что такое трение? 2-е изд. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 230 с.
- Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 279 с.
- Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. 413 с.
- Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. 2-е изд. М.: Химия, 1976. 432 с.
- Зимон А. Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 352 с.
- Зимон А. Д., Андрианов Е. И. Аутогезия сыпучих материалов. М.: Металлургия, 1978. 288 с.
- Кротова Н. А. О склеивании и прилипании. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 168 с.
- Липатов Ю. С. Межфазные поверхностные явления в полимерах. Киев: Наук. думка, 1980. 260 с.
- Овчаренко Ф. Д. Мир опознанных величин. М.: Знание, 1979. 64 с.
- Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.

АДГЕЗИЯ — БУДНИ И ПРОГРЕСС

ТЕРМИНОЛОГИЯ

Суровые годы Великой Отечественной войны. Знаменитые истребители военных лет Як-6. Налажен серийный выпуск машин, и вот непредвиденное обстоятельство. Как вспоминает генеральный конструктор самолетов А. С. Яковлев, краска на фюзеляже и крыльях вспучилась, и часть боевых самолетов не смогла подняться в воздух. К чести работников промышленности, они сумели быстро принять дополнительные меры для усиления адгезии краски.

В приведенном примере адгезия — это связь между слоем краски и основанием, т. е. материалом фюзеляжа и крыльев самолета. Этот вид адгезии мы называем *адгезией пленок*.

Термин *адгезия* широко употребляется в научной литературе и известен специалистам; в переводе с английского и немецкого на русский язык он означает: прилипание, сцепление, слипание или притяжение.

Прилипание! Что же тут неизвестного? В школах и институтах, например, широко используются мел и доска. В результате адгезии частиц мела к доске образуются буквы, цифры, чертежи или рисунки. Стоит ли разъяснять такие простые вещи? Не торопитесь делать поспешные выводы.

Действительно, из-за своей повседневности и кажущейся простоты адгезия представляется явлением знакомым, не требующим пристального рассмотрения. Однако это далеко не так.

Кроме адгезии пленок, в частности слоя краски, существуют и другие виды адгезии.

В современных карьерах, где добыча полезных ископаемых производится открытым способом, применяют мощные роторные экскаваторы, рабочим органом которых является колесо, имеющее по окружности ковши. Для доступа к угольным или рудным пластам необходимо удалить горные породы. Повышенная адгезия породы к ковшам ротора, транспортерам и механизмам, обслуживающим

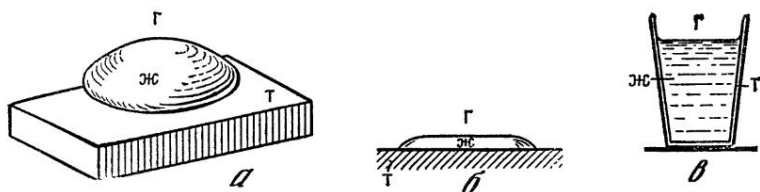


Рис. 1. Адгезия жидкости в виде капли (а), пленки (б) и при нахождении ее в емкости (в)

г, ж, т — условные обозначения газовой среды, жидких и твердых тел

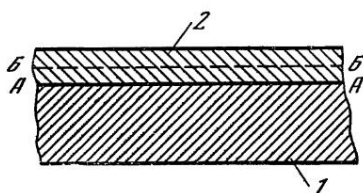
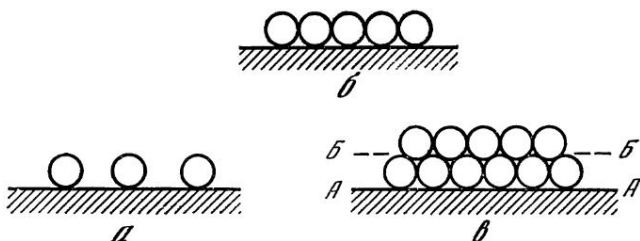


Рис. 2. Адгезия пленок

1 — основа (субстрат);
2 — пленка (адгезив)

Рис. 3. Адгезия отдельных частиц (а), монослоя (б) и полислоя (в) частиц



и других печатных изданий, должны обладать достаточной адгезией к печатной форме, а при контакте формы с бумагой — переноситься на бумагу и закрепляться на ней. Адгезия типографских красок, с которой мы встречаемся в полиграфии, — это еще один вид адгезии — *адгезия жидкости*. Адгезия жидкости обусловлена связью, которая образуется между твердой поверхностью и жидкостью, контактирующей с этой поверхностью.

Явление адгезии относится к числу поверхностных явлений, т. е. таких, которые возникают на границе раздела соприкасающихся фаз. Фазой называют однородную часть системы, обладающую одинаковым составом, физическими и химическими свойствами и отделенную от других частей системы поверхностью раздела. В случае адгезии

типографских красок к бумаге слой краски можно рассматривать как одну фазу, т. е. одну часть системы, а бумагу — как другую. Сами краски — сложные системы. Так, в состав типографских красок входят красители, растворители и ряд других компонентов. Адгезия характерна для жидкости и твердых тел, которые в отличие от газов называют конденсированными телами, однако она не исключена для пузырьков газа на поверхностях жидкостей и твердых тел. На границе раздела между газом и конденсированными телами могут происходить процессы, о которых мы поговорим позже.

Подведем первые итоги.

Адгезией, или прилипанием, называют явление, которое возникает при контакте двух разнородных конденсированных тел. Этот контакт происходит на границе раздела фаз. Адгезия характеризует связь между двумя телами; для нарушения этой связи необходимо внешнее усилие. Адгезия возникает при контакте твердых тел с жидкостями, а также при контакте жидкостей с твердыми телами. Когда одним из контактирующих тел является твердая поверхность, в качестве другого могут быть жидкость, твердые пленки или частицы. В связи с этим различают адгезию жидкости, пленок и частиц. Эти виды адгезии схематически показаны на рис. 1—3.

ВИДЫ АДГЕЗИИ

Три вида адгезии — жидкости, пленок и частиц — имеют много общего. Во всех случаях — это связь между различными телами на границе раздела фаз, для нарушения которой необходимо внешнее усилие. Несмотря на общность, каждый вид адгезии имеет свои особенности. Уяснить эти особенности можно при помощи рис. 1—3.

На рис. 1 представлены различные варианты адгезии жидкости. Жидкость может находиться на твердой поверхности или в каком-либо сосуде. Часто приходится наблюдать, например, что во время дождя на поверхности оконного стекла появляются капли воды. Кроме того, жидкость может находиться на твердой поверхности в виде пленок или соприкасаться со стенками сосуда, в который она помещена.

Отличительной особенностью всех вариантов адгезии жидкости является связь между двумя разнородными телами, имеющими различное агрегатное состояние — жид-

кое и твердое. Связь эта осуществляется по определенной площади, или, как говорят, по площади контакта двух тел. Размеры и формы этой площади определяются конфигурацией твердого тела и могут быть различными. Величина площади контакта капли (рис. 1, а) довольно значительная. Она может быть соизмерима с поверхностью капли.

При адгезии пленок реализуется связь между двумя твердыми поверхностями (рис. 2). Одна из них выполняет роль основания. В технической литературе основание часто называют субстратом. На основание, или субстрат, наносят пленку, толщина которой незначительна. Прилипшую пленку называют адгезивом.

Связь между адгезивом и субстратом, как и в случае адгезии жидкости, осуществляется по определенной площади контакта. Размеры этой площади определяются размерами субстрата. Поэтому адгезия пленок, так же как и адгезия жидкости, характеризуется значительной площадью контакта.

В случае адгезии частиц (рис. 3) связь осуществляется между двумя твердыми поверхностями. В отличие от адгезии пленок и жидкости (рис. 1, 2) контакт частиц осуществляется не по всей поверхности твердого тела. Площадь контакта незначительна — она составляет лишь часть площади поперечного сечения прилипших частиц.

Когда частиц сравнительно немного, то имеет место адгезия отдельных частиц. Обратите внимание на рис. 3, а. Прилипшие частицы не соприкасаются между собой — в этом отличительная особенность данного случая адгезии. Когда частиц много и они соприкасаются между собой, то образуются монослой и полислой прилипших частиц. Адгезия одного слоя, или монослоя, показана на рис. 3, б. Полислой прилипших частиц состоит по крайней мере из двух монослоев (рис. 3, в). В отличие от адгезии отдельных частиц в случае формирования монослоя и полислоя имеет место соприкосновение между собой прилипших частиц.

Несмотря на различные варианты адгезии частиц (отдельных частиц, монослоя и полислоя), характерные особенности этого вида адгезии заключаются во взаимодействии частиц с поверхностью и в ограниченной площади контакта отдельных частиц.

Характеристика всех видов адгезии, т. е. адгезии жидкости, пленок и частиц, в обобщенном виде дана в таблице.

Характеристика различных видов адгезии

Адгезия	Номер рисунка	Контактирующие поверхности	Площадь контакта	Следствия адгезии
Жидкости	1	Твердое тело—жидкость	Значительная	Формирование капель или тонкого слоя жидкости
Пленок	2	Твердое тело—твердое тело	»	Экранировка поверхностей прилипшей пленкой
Частиц	3	То же	Ограниченная	Преимущественное удержание мелких частиц

Проанализируем сведения, которые приведены в этой таблице, и подчеркнем особенности и общность различных видов адгезии.

Адгезии пленок и жидкости свойственна значительная площадь контакта. Эти два вида адгезионного взаимодействия различаются природой контактирующих тел. В одном случае, при адгезии жидкости, речь идет о контакте жидкости с твердой поверхностью, а в другом, при адгезии пленок, контактируют между собой две твердые поверхности.

Адгезию частиц и пленок роднит однотипность соприкасающихся конденсированных тел — это твердые тела. Отличие заключается в форме прилипших тел и в размере площади контакта. При адгезии пленок площадь контакта значительная, а при адгезии частиц — она ограниченная.

Следствия адгезии различны. В случае адгезии жидкости на поверхности могут формироваться тонкие слои или капли, прилипшие пленки экранируют поверхность субстрата, а в результате адгезии закрепляются преимущественно мелкие частицы.

Адгезия жидкости проявляется только по отношению к тонким слоям или каплям. Удержание всей жидкости на поверхности не определяется одной лишь адгезией к этой поверхности, а зависит от сил взаимодействия молекул жидкости, которые не столь значительны. Неудивительно, что жидкость сравнительно легко удаляется с поверхности и даже при значительной адгезии остается лишь тонкий слой.

В отличие от жидкостей твердые тела обладают прочностью, поэтому адгезия определяет удержание на поверхностях не только тонкого слоя, но всего прилипшего тела.

На этом пока прервем рассмотрение общности различных видов адгезии. В дальнейшем будет показано, что они связаны более глубоко — единством причин, обуславливающих различные виды адгезии.

КОНКУРЕНЦИЯ И ПОБЕДА СИЛЬНЕЙШЕГО

У адгезии есть сопутствующие явления. Одно из них — аутогезия, которая иногда может выступать в роли конкурента.

Очевидно, вам приходилось наблюдать выгрузку грунта из кузова самосвала. Большая часть грунта сравнительно легко удаляется при наклоне кузова, но некоторая часть грунта все же остается на дне. Особенно велик этот остаток, когда глинистый грунт увлажнен.

Почему и при каких условиях часть грунта не удаляется из кузова самосвала? Помимо связи между частицами грунта и материалом кузова, т. е. адгезией частиц, существует связь между частицами грунта. Эта связь называется *аутогезией*. При разгрузке кузова самосвала адгезия конкурирует с аутогезией, и в результате конкуренции побеждает сильнейший. Если адгезия значительно превышает аутогезию, то, как всегда, обрывается наиболее слабая связь. Слабой здесь будет аутогезия, поэтому за счет адгезии часть грунта останется в кузове самосвала.

А теперь представим другой случай: адгезия грунта значительно меньше аутогезии. При разгрузке кузова будет нарушаться слабое адгезионное взаимодействие, что приведет к полному удалению грунта из кузова самосвала.

Конкуренцию между адгезией и аутогезией можно выразить при помощи схемы, приведенной на рис. 3, в. Адгезионный отрыв частиц произойдет по линии *АА*, а аутогезионный — по линии *ВВ*.

Адгезионный отрыв, при котором удаляются все прилипшие частицы, осуществляется по поверхности раздела частицы — твердое тело. В случае аутогезионного отрыва нарушается поверхность раздела частицы — частицы. Часть прилипшего слоя, находящаяся ниже линии *ВВ* (рис. 3, в), остается на поверхности.

Условия отрыва грунта определяются неоднозначностью сил адгезии и аутогезии, структурой и массой прилипшего слоя и другими факторами (некоторые из них будут рассмотрены подробнее). Поэтому прилипший слой может иметь неодинаковую толщину, а отрыв грунта — осуществляться не по всей поверхности.

Конкуренция между адгезией и аутогезией проявляется на практике. В горнодобывающей промышленности нашей страны объем перевозок сыпучих материалов и горной массы в 1980 г. составлял около 10 млрд. т. Представим себе, что 1—2% этой массы будет удерживаться в результате превосходства адгезии над аутогезией. Это означает, что ежедневно почти полмиллиона тонн горной массы останется на стенках кузовов самосвалов и железнодорожных вагонов, на лентах транспортеров и на поверхности других транспортных средств. Если их не очистить, то огромное количество горной породы будет транспортироваться впустую. При удалении прилипшего слоя приходится терпеть значительные убытки из-за вынужденного простоя транспортных средств. Вот что на практике значит конкуренция адгезии и аутогезии.

Адгезия почвы к лемеху плуга в известной степени определяет необходимое тяговое усилие трактора, что непосредственно связано с требованиями к мощности и фактическими затратами энергии тракторного двигателя. Опыты показывают, что лучшие условия работы трактора реализуются тогда, когда осуществляется адгезионный отрыв почвы на границе поверхность плуга—частицы почвы (см. рис. 3, в). Если к лемеху плуга прилип слой почвы, то при движении плуга в почве нарушается граница раздела между частицами и имеет место аутогезионный отрыв; для его осуществления потребуется большее тяговое усилие трактора по сравнению с адгезионным отрывом.

На практике, в процессе пахоты, стремятся обеспечить адгезионный отрыв слоя почвы. Чем слабее адгезия почвы к поверхности плуга, тем эффективнее используется мощность трактора. Уменьшение адгезии почвы достигается, в частности, путем подбора материала плуга.

Аутогезия нередко выступает как самостоятельное явление и проявляется независимо от адгезии. Аутогезия частиц почвы, например, играет существенную роль в таких процессах, как пыльные бури, изменение русла рек, ветровая и водная эрозия. Мы рассмотрим их в разделе «Следствия адгезии».

Итак, адгезии частиц родственно такое явление, как аутогезия, которая характеризует связь между частицами. Аутогезия может проявляться самостоятельно или в конкурентной борьбе с адгезией. Аутогезия встречается во всех случаях применения сыпучих материалов и переработки горных пород.

ХЛЕБ И АДГЕЗИЯ

На хлебопекарных заводах тесто готовят в больших чанах, называемых дежами. Затем машины дозируют тесто и заготовки направляются по транспортерам в печи, где выпекается хлеб. На всех стадиях приготовления и обработки заготовок имеет место адгезия теста к поверхностям технологического оборудования.

В производственных условиях адгезия теста нежелательна: часть прилипшего теста теряется безвозмездно, прилипшую массу приходится удалять. Особый вред приносит адгезия в процессе выпечки хлеба. Происходит пригорание части продуктов к формам, которые очищают вручную и смазывают растительным маслом. При выпечке одного миллиона тонн хлеба, что примерно соответствует годовому потреблению хлеба жителями Москвы и ее окрестностей, для борьбы с адгезией необходимо затратить 1000 т растительного масла и труд 400 рабочих.

Таким образом, предотвращение адгезии теста непосредственно связано с экономией трудовых и материальных ресурсов.

Адгезия выступает в конкуренции с родственным ей явлением, именуемым когезией. Адгезия характеризует связь между тестом и другими поверхностями, а когезия определяет прочность тела, в данном случае теста.

Схематически соотношение между когезией и адгезией можно представить при помощи рис. 2. В случае адгезии, слабой по отношению к когезии, в результате внешнего воздействия происходит нарушение взаимодействия по плоскости *АА*. При незначительной когезии оно осуществляется по плоскости *ББ*.

Так же как и при определении конкуренции между адгезией и аутогезией, можно охарактеризовать условия преодоления адгезии или когезии при нарушении контакта двух тел. Адгезию и когезию можно оценить с помощью работы, необходимой для разъединения контактирующих между собой разнородных ($W_{ад}$) и однородных

(W_k) тел. Величина $W_{ад}$ характеризует равновесную работу адгезии двух тел, а W_k определяет равновесную работу когезии одного и того же тела.

При нарушении границы раздела по плоскости AA , т. е. в случае адгезионного удаления, соотношение между работой адгезии и работой когезии будет следующим:

$$W_{ад} < W_k \quad (1)$$

Условия преодоления когезии одного из тел можно представить в виде

$$W_{ад} > W_k \quad (2)$$

В случае, когда адгезия и когезия близки между собой, возможен смешанный адгезионно-когезионный отрыв.

Соотношения (1) и (2) имеют большое практическое значение. Рассмотрим их применительно к полиграфическому процессу, о котором говорилось выше. При наложении бумаги на печатную основу часть краски переносится на бумагу, образуя соответствующий оттиск. Подобный перенос соответствует когезионному удалению слоя краски. Специалисты стремятся так подобрать свойства типографских красок и основы, чтобы обеспечить адгезионное удаление, т. е. выполнить соотношение (1). При адгезионном отрыве краска переносится полностью, улучшается качество и упрощается процесс получения цветных оттисков.

Аналогично обстоит дело и с тестом. Когезионное его удаление, когда адгезия превышает когезию, нежелательно. Выполнение соотношения (2) означает прилипание части теста к внутренним поверхностям различных емкостей, к деталям технологического оборудования и лентам транспортеров хлебопекарных заводов. Повышенная адгезия теста приводит к потерям пищевого сырья и снижению производительности оборудования. На практике приходится применять дополнительные меры для уменьшения адгезии, чтобы обеспечить выполнение условия (1) и победу когезии. Снижение адгезии теста, в частности, можно достигнуть, применяя полимерные материалы для покрытия внутренних поверхностей оборудования и форм для выпечки хлеба.

Когезия проявляется и в конкуренции с адгезией других твердых тел. Кому не приходилось получать письма и вскрывать конверт? Даже соблюдая осторожность, трудно вскрыть конверт по месту склеивания, не повредив

его. Происходит это потому, что адгезионное взаимодействие здесь превышает прочность самой бумаги, т. е. ее когезию. При вскрытии конверта побеждает сильнейший партнер. Если сильнейшим оказывается адгезия, то происходит нарушение прочности бумаги и реализуется условие (2). Более всего это удручает коллекционеров, например филателистов, желающих сохранить неповрежденные конверты и марки.

Окрашенные изделия иногда покрываются трещинами. Трещины возникают в результате слабой когезии самой пленки, не способной противодействовать внутренним напряжениям. Сплошность пленки нарушается, и обнажаются незащищенные участки. Когезия материала пленок является необходимым условием создания сплошного покрытия и его необходимой адгезии, в том числе и адгезии краски к фюзеляжу и крыльям самолета, с рассказа о которой мы начали эту главу.

Итак, когезия характеризует свойства самого материала, а адгезия — поверхностные явления, которые возникают на границе раздела фаз. Существует взаимосвязь и взаимозависимость адгезии, аутогезии и когезии. Аутогезия сопутствует адгезии частиц и проявляется как конкурирующее явление, а когезия сопровождает адгезию жидкости и пленок (см. рис. «Древо адгезии»).

Конкуренты и сопутствующие явления: аутогезия и когезия.

БУДНИ

Адгезия — чрезвычайно распространенное явление; чтобы убедиться в этом, проанализируем то, что хорошо знакомо. Попробуем написать что-то на лощеной бумаге: сплошные линии отсутствуют, чернила могут свернуться в шарики, а изображения букв получаются разорванными. Одна из причин этого — плохая адгезия чернил. Нечто подобное наблюдается, например, если написать чернилами на полиэтиленовой пленке, широко используемой для упаковки множества изделий и товаров, в том числе пищевых продуктов. К полиэтиленовой пленке, так же как и к лощеной бумаге, адгезия чернил плохая, и текст можно легко удалить.

Попробуем написать на папиросной бумаге: буквы расплываются и разобрать текст порой невозможно. В этом случае проявляется другая крайность: пористая

структура бумаги, а также чрезмерная адгезия чернил приводят к тому, что чернила легко расплываются.

Писчая бумага должна обладать необходимыми качествами, например эластичностью, определенной прочностью и т. д. Но все же основным критерием качества бумаги является четкое воспроизведение того, что написано. Это невозможно без учета адгезии чернил к бумаге. Именно для этого (адгезии чернил к бумаге) при производстве бумаги предусмотрена специальная технологическая операция — пропитка материала, из которого изготавливается бумага, клеящим веществом.

В результате оседания и адгезии частичек, находящихся в воздухе, загрязняются оконные стекла. Миллионы людей тряпками и щетками моют окна и не подозревают, что тем самым борются с отрицательными последствиями адгезии. А теперь представим, что в нашем распоряжении имеются специальные средства для мытья окон, которые сообщают стеклу антиадгезионные свойства: отпала бы необходимость мыть окна, и сколько труда можно было бы сэкономить! К сожалению, пока эта задача не решена: имеющиеся средства успешно способствуют очистке окон, но еще не сообщают стеклу антиадгезионных свойств.

Для стирки одежды и белья разработано много препаратов, доступных каждому. Стоит вспомнить обыкновенное мыло и такие стиральные порошки, как «Лотос», «Астра», «Лоск» и др. Еще лет 30 тому назад о свойствах стиральных порошков знали немногие. В настоящее время их и подобные им составы используют не только для стирки, но и для других целей в горной, нефтедобывающей, электронной и многих других отраслях промышленности.

При стирке мы встречаемся со случаем, когда один из видов адгезии противодействует другому. Разберемся в этом более подробно. Белье и одежда загрязняются. Причиной загрязнения являются мелкие частички, которые различным путем попадают на одежду и в результате адгезии закрепляются на ней. Процесс стирки заключается в отрыве этих частиц от ткани, переводе их в водную среду и удалении вместе с водой. В холодной воде стирка не приводит к желаемым результатам. Дело в том, что адгезия воды к ткани в этих условиях сравнительно низка. Вода не полностью контактирует с материалом, или, как говорят, плохо его смачивает. По этой причине снижение адгезии частиц загрязнений оказывается недостаточным и белье остается грязным. Кроме того, в холодной воде

трудно удалить жировые загрязнения. При повышенной температуре они размягчаются и удаляются значительно легче.

Удаление частиц загрязнений резко усиливается при добавлении в воду стирального порошка. Водные растворы стиральных порошков обладают моющим действием. Эти растворы проникают между частичками загрязнений и тканью, уменьшается адгезия частичек к ткани и облегчается их отделение. Снижение адгезии частичек загрязнений происходит не только в результате лучшего смачивания, но и по другим причинам, некоторые из них будут рассмотрены ниже (см. гл. «Подобно клину»). Моющее действие заключается не только в способности стиральных порошков удалять частицы загрязнений, но и удерживать их в растворе во взвешенном состоянии. Тут важную роль играет образование пузырьков пены. Частицы загрязнений прилипают к поверхности пузырьков, что и способствует их удалению и удержанию в растворе.

Нечто подобное происходит во время гигиенических водных процедур, когда роль моющего средства выполняет обычное мыло, которое представляет собой растворимые в воде натриевые (или калиевые — жидкое мыло) соли жирных кислот (в основном стеариновой и пальмитиновой). Сама по себе вода не в состоянии бороться с адгезионным взаимодействием загрязнений. Мыльная вода лучше смачивает кожу. Повышенная адгезия мыльной воды к коже и присутствие пузырьков пены способствуют отрыву частиц загрязнений. Затем частицы загрязнений прилипают к пузырькам и с ними удаляются. Этого не произойдет, если использовать обычное мыло в морской воде. Находящиеся в морской (и в «жесткой») воде ионы кальция и магния образуют плохо растворимые в воде соли жирных кислот, коркой покрывающие кусок мыла, которое далее не растворяется, и удаление частиц загрязнений не происходит. Чтобы все-таки использовать морскую и «жесткую» воду для мытья и стирки, есть два пути: создать препараты, не реагирующие с ионами кальция, магния и других многовалентных металлов, или вводить в состав моющих композиций вещества, которые связывают ионы кальция и магния и тем самым сохраняют моющее действие основного препарата. В настоящее время реализованы оба эти пути.

Обратимся теперь к предметам домашней обстановки. Перед нами телевизор. Адгезия используется при изго-

товлении основной части телевизора — экрана кинескопа. Он представляет собой многослойную пленку, нанесенную на стекло трубки с внутренней стороны. Один из слоев пленки, например, содержит специальные вещества — люминофоры, которые с различной интенсивностью светятся под воздействием электронного луча различной силы. Другие слои пленки выполняют связующую и защитную роль. Еще более сложный состав имеет экран цветных телевизоров. Работа кинескопа и телевизора в целом будет надежной лишь тогда, когда осуществляется необходимое взаимодействие между слоями пленки и адгезия пленки к основе — внутренней стороне смотрового стекла электронно-лучевой трубки. Вакуумные электронные лампы телевизора и других радиотехнических приборов имеют на внутренней поверхности прочно прилипший слой некоторых металлов, например бария. Он служит для поглощения оставшихся после откачки или выделяющихся при эксплуатации газов и обеспечивает продолжительную работу ламп. Адгезия этого слоя является одним из условий стабильного функционирования ламп, а следовательно, и всего радиотехнического устройства.

Присмотритесь внимательно к легковому автомобилю. Кузов автомобиля окрашен. Передний и задний бамперы, ободки фар и многие другие детали покрыты слоем хрома или никеля. Сидения сделаны из многослойного синтетического материала. Шины собраны из нескольких слоев прорезиненной ткани — корда, образующих каркас, к которому сверху приварен толстый слой резины — протектор. Связь пленок краски и металлов с основой, слоев синтетических материалов и резины, связь резины и кордной ткани — все это проявление в различных вариантах одного из видов адгезионного взаимодействия — адгезии пленок.

При эксплуатации автомобиля проявляются и другие виды адгезии. Так, к ветровому стеклу автомобиля прилипают капли дождя, что ограничивает видимость. Между цилиндром двигателя и поршнем находится тонкий слой масла. Без адгезии этого слоя работа двигателя была бы невозможной. Адгезия капель дождя и слоя масла относится к адгезии жидкости.

После поездки по проселочной дороге и в условиях города поверхность автомобиля покрывается слоем пыли или грязи. Загрязнения удерживаются подчас настолько прочно, что для их удаления недостаточно даже сильной

струи воды и требуется механическая мойка. На внутреннюю поверхность камеры сгорания и днище поршня налипают частицы нагара. Адгезия пыли, грязи и нагара — это одна из форм проявления адгезии частиц.

Приведенные примеры различных видов адгезии в значительной степени характерны и для других средств транспорта.

В домах, в которых мы живем, адгезия проявляется не только в удержании на стене обоев, краски, штукатурки, но и в связи бетона, раствора кирпичной кладки, элементов фундамента и грунта, а также многих других узлов и арматуры зданий.

Этими примерами пока ограничим рассмотрение различных видов адгезии применительно к тому, что нас окружает и что порой мы не всегда замечаем.

ПОДОБНО «СИАМСКИМ БЛИЗНЕЦАМ»

В начале первой главы мы познакомились с одним из видов адгезионного взаимодействия — адгезией слоя краски. Без адгезии красок не может существовать и развиваться современная промышленность.

Если на какую-либо основу нанести тонкий слой материала, то этот слой будет выполнять роль покрытия или пленки, предохраняющей основание. В технической литературе нет строгого разграничения между понятиями «пленка» и «покрытие». Пленками обычно называют тонкие слои материалов, применяемых для таких целей, как упаковка, изоляция и т. д. Покрытиями называют нанесенные на основу тонкие слои, например краски или металла, с целью придания поверхности определенных свойств либо с целью ее защиты. Подобные функции могут выполнять и пленки. Поэтому в дальнейшем для сокращения вместо терминов «пленки и покрытия» будем применять какой-либо один термин: «пленки» или «покрытия», имея в виду прилипшие пленки.

Нет необходимости подчеркивать распространенность окрашенных изделий; они представляются нам так, как будто слой краски составляет единое целое с изделием. Иногда основа и пленка лакокрасочного материала настолько зависимы друг от друга, что не могут существовать порознь. Адгезия обеспечивает их сосуществование как своеобразных «сиамских близнецов». Когда-то в Таиланде, который называли Сиам, родились близнецы, сросшие-

ся в области крестца. Жизнь таких близнецов взаимосвязана: смерть одного из них приводит к гибели другого. Похоже обстоит дело и со многими изделиями, требующими окраски.

Разберем более подробно причины такой взаимозависимости основы и прилипшей к ней пленки. Вам, наверное, не приходилось видеть одну пленку краски без основы. Подобная пленка сама по себе не представляет ценности, да и не сможет существовать из-за своей непрочности. Почему нельзя применять неокрашенные изделия? Краска придает изделию более привлекательный вид, но не в этом ее главное назначение. Слой краски предохраняет поверхность изделия от действия окружающей среды. Если металлические изделия не окрашены, то возникает коррозия — разрушение материала и изделия за счет различных форм окисления. Подсчитано, что для компенсации последствий коррозии во всем мире ежегодно расходуется не менее 10% вновь добываемых металлов.

Если нарушается прочность защитного слоя краски, то в области повреждения начинается коррозия металла, уходящая под краску, которая в результате отслаивается. Подобно сиамским близнецам, погибают оба — и краска и основа.

Слой краски, нанесенный на деревянные изделия, предохраняет основу от воздействия влаги, солнца, высокой и низкой температур, но особенно от воздействия микроорганизмов, вызывающих гниение и иное разрушение древесины. Защитные функции выполняет пленка краски и по отношению к оштукатуренным стенам зданий и во множестве других случаев.

Таким образом, адгезия красок является одним из средств сохранения материальных ресурсов.

Следует отметить, что на практике применяют ряд дополнительных мер для усиления адгезии краски. К числу этих мер относится нанесение промежуточного грунтового слоя. Зачастую этот грунт обеспечивает и долговечность адгезии.

В широко применяемой эмалированной посуде эмаль и основа, на которую она наносится, тоже взаимосвязаны, как сиамские близнецы. Стоит эмали надколоться, как коррозия быстро «проест» стенку и кастрюля выйдет из строя.

Мы восхищаемся искусством русских зодчих, создавших Московский Кремль. Среди их творений особое место

занимают позолоченные купола соборов. Толщина слоя позолоты незначительна — всего несколько сотых долей миллиметра. Сама по себе пленка золота такой толщины вряд ли может быть использована для практических целей: она будет изгибаться, деформироваться и терять свою первоначальную форму. Вот тут-то и вступает в свои права адгезия. Стоит только пленку золота нанести на основу купола, как она становится единым целым с этим куполом и живет долго.

Адгезия пленок — широко распространенный вид адгезионного взаимодействия. Практическое применение этого взаимодействия не ограничивается примерами, которые приводились выше. Металлические пленки никеля, хрома, серебра и других металлов сообщают поверхности токопроводящие, защитно-декоративные и другие свойства. Адгезия металлических пленок широко применяется в различных технических устройствах.

Становление и развитие кино- и фотопромышленности неразрывно связано с адгезией. На гибкую основу пленки, обычно изготовленную из полимерного материала, наносят специальные светочувствительные составы в виде тонкого слоя. Именно этот тонкий прилипший слой придает пленке необходимые свойства. Основа и тонкий слой представляют собой единое целое. Тонкий слой не может быть применен без основы, так же как и сама основа не представляет отдельной потребительской ценности.

Все большее применение находят декоративные самоклеющиеся пленки, которые могут выполнить свое назначение лишь в том случае, когда они нанесены на основу и в результате адгезии прочно закреплены в ней.

Для противопожарных целей, предотвращения распространения огня и сгорания материалов разработана специальная полимерная пленка. Она наносится на дерево или любой другой материал и в результате адгезии экранит его.

Под действием высокой температуры полимерная пленка вспучивается и увеличивает свой объем примерно в 50 раз, создавая тем самым теплозащитный слой. Этот слой в течение часа предохраняет материал и предотвращает распространение огня.

Таким образом, на каких бы случаях мы ни остановили свое внимание, всегда при использовании пленок или покрытий адгезия обуславливает их сосуществование с основой. Пленка и основа в результате адгезии представ-

ляют собой единое целое. В этом и заключается особенность адгезии пленок, которая свойственна только этому виду адгезионного взаимодействия.

ЗЕЛЕНый САНИТАР

Среда нашего обитания, обеспечивая человеку жизненно необходимые ресурсы, прежде всего воздух и воду, в то же время требует заботливого к себе отношения.

В вопросах охраны окружающей среды адгезия не пассивна, а является активно действующим фактором. Она имеет прямое отношение к очистке воздуха и воды от находящихся там нежелательных примесей в виде частиц. Из форм адгезионного взаимодействия здесь проявляется главным образом адгезия частиц.

В некоторых случаях частички загрязнений в воздухе отрицательно влияют на качество выпускаемых изделий, работу отдельных систем и даже на прочность сооружений. Разберем наиболее характерные примеры. При производстве кинескопов, полупроводниковых приборов и других подобных деталей радиоэлектронной аппаратуры достаточно проникновения из воздуха одиночных пылевых частиц, чтобы их адгезия вызвала дефект. Поэтому приходится принимать специальные меры для предотвращения попадания и адгезии атмосферной пыли.

Казалось бы, какое отношение имеет адгезия к передаче электрической энергии на большое расстояние? Оказывается, самое прямое. На опорах передач устанавливаются изоляторы для крепления проводов. Материал изоляторов не проводит электрический ток, но к поверхности изоляторов могут прилипнуть частицы атмосферных загрязнений. Тогда изоляторы теряют свои изоляционные свойства и становятся токопроводящими, а это может привести не только к потере электроэнергии, но и вызвать аварию. Поэтому приходится принимать специальные меры для предотвращения адгезии атмосферных загрязнений: изоляторам придают такую форму, которая снижает вероятность адгезии частиц при обтекании изолятора запыленным воздушным потоком, а поверхность изоляторов подвергают специальной обработке для уменьшения адгезии частиц к ним.

К корпусу кораблей могут прилипнуть водоросли и морские организмы, способные быстро размножаться — происходит обрастание подводной части корпуса судна.

Обрастание снижает скорость движения корабля, вызывает перерасход топлива и способствует ускоренной коррозии корпуса судна. Кроме пассивных методов борьбы с обрастанием, которые связаны с удалением прилипшего слоя, применяют активные методы, направленные на предотвращение первичного акта процесса обрастания — снижение или исключение адгезии микроорганизмов. К числу активных методов относится нанесение на корпус корабля изолирующих пленок и специальных лакокрасочных материалов, а также использование гладких поверхностей, исключающих зацепление микроорганизмов.

В состав нефти входит кристаллический парафин. При движении нефти по трубопроводам возможна адгезия частиц кристаллического парафина к поверхностям. Это явление крайне нежелательно, так как приводит к снижению пропускной способности нефтепроводов. Приходится принимать дополнительные меры к снижению содержания парафина в нефти или уменьшению его адгезии к внутренним поверхностям трубопровода.

Адгезия частиц имеет прямое отношение и к сохранности памятников старины и монументов. Более 2500 лет афинский Акрополь, несмотря на разрушения, причиняемые пожарами, землетрясениями, набегами чужеземных захватчиков в прошлом, стойко выдерживал все испытания времени. В наши дни этому всемирно известному памятнику угрожает серьезная опасность из-за адгезии... Дело в том, что расположенные вблизи него промышленные предприятия выбрасывают в атмосферу большое количество вредных примесей в виде частичек и капель. Эти частички и капли прилипают к мрамору, из которого сделана облицовка Акрополя. В результате адгезии происходит накопление загрязнений, разрушающих мрамор.

Монумент, воздвигнутый в Москве у ВДНХ в честь покорителей Космоса, почти не подвергается загрязнению. И не только потому, что воздух около ВДНХ значительно чище, чем вблизи Акрополя, а потому, что монумент сделан из специального титанового сплава, материал которого по отношению к атмосферным загрязнениям обладает пониженной адгезионной способностью и повышенной стойкостью.

Для сохранения чистоты воздуха и воды необходимо избегать попадания частиц загрязнений в окружающую среду. С этой целью широко применяются различные фильтры, но весь воздух планеты подвергнуть фильтра-

ции невозможно. На помощь приходит сама природа. Лиственные породы деревьев могут выполнять роль своеобразного зеленого санитара. Этот санитар способен принимать на свои листья большое число частиц, засоряющих воздух. В результате адгезии частиц загрязнений к листьям растений происходит естественная фильтрация воздуха и его очистка. Листья деревьев могут удерживать до одного грамма частиц загрязнений на один квадратный метр. Площадь листьев взрослого дерева достигает 300 м². Это означает, что природный фильтр способен поглотить за счет адгезии до 300 г мельчайших частиц загрязнений. Загрязнения, прилипшие к листьям растений, затем под действием ветра, дождя и других атмосферных явлений могут вновь возвращаться на землю.

Не всегда, однако, адгезия частиц загрязнений к растениям полезна. Например, адгезия частиц загрязнений снижает качество хлопка. Учитывая огромные масштабы сбора хлопка в нашей стране, нетрудно представить себе колоссальный объем работы по очистке его от различных загрязнений. Частицы атмосферных загрязнений, которые в результате адгезии удерживаются на листьях табака, в дальнейшем могут ухудшить качество выпускаемой продукции.

Иногда необходимо искусственным путем усиливать адгезию частиц к листьям растений. Например, инсектициды для борьбы с вредными насекомыми нередко применяют в виде порошков. Однако при простом распылении только незначительная часть порошка — 10—20% от общего количества — прилипает к листьям растений. К тому же часть прилипших частиц впоследствии удаляется под действием ветра и дождя. Поэтому для усиления адгезии порошка инсектицидов принимаются специальные меры, в частности распыление препаратов в электрическом поле высокого напряжения: частицы получают дополнительный заряд, который усиливает их адгезию к листьям растений. В конечном счете, несмотря на определенные достоинства порошковой формы, приходится применять препараты в виде вязких жидкостей, адгезия которых к листу значительно больше, чем порошков.

Диаметрально противоположную роль выполняет адгезия в гальванотехнике — процессе электролитического осаждения металлов на металлические и неметаллические изделия. В одном разделе этой отрасли техники, называемом гальваностегией, необходимо получать тонкую прочно

прилипшую пленку металла, а в другом — в гальванопластике — реализуется пониженная адгезия, позволяющая получать легко отделяемые копии различных предметов.

В основе гальванотехники лежит осаждение положительно заряженных ионов металла на катоде, отрицательно заряженном электроде. Для хорошей адгезии гальванических покрытий исходную поверхность тщательно очищают от окислов и жировых загрязнений. Образующаяся тонкая пленка, толщина которой для олова может колебаться от 0,2 до 2 мкм, должна иметь мелкокристаллическую структуру и равномерную толщину. Особенно трудно добиться равномерного покрытия изделий сложной конфигурации. В этом случае добавляют различные вещества, в том числе и поверхностно-активные. Для каждого покрытия разработана своя технология нанесения, обеспечивающая максимальную адгезию. Методами гальваностегии получают прилипшие пленки — покрытия из олова, цинка, хрома, никеля, меди, серебра, золота и др., т. е. в принципе из всех тех металлов, которые необходимы для практических целей.

Снижение адгезии в гальванопластике достигается подбором поверхности основы, называемой матрицей, и применением промежуточного слоя, в качестве которого может быть использован мелкочешуйчатый графит. Методом гальванопластики можно получать барельефы, статуи и другие фигурные изделия. Этот метод используется также для изготовления матриц грампластинок.

Итак, какую бы сферу ни затронуть — быт, промышленность, сельское хозяйство, природу в целом, повсюду мы наблюдаем проявления адгезии. В одних случаях адгезия определяет процесс, в других — выступает лишь как сопутствующее явление (см. рис. «Дерево адгезии»).

Действие различных видов адгезии не всегда совпадает с целями, поставленными человеком. Когда они совпадают, мы считаем эффект полезным; иногда же адгезия приносит вред. Отрицательные последствия, в частности, наблюдаются в случае адгезии частиц атмосферных загрязнений.

Продолжая начатое знакомство с адгезией, подытожим:
виды — адгезия жидкости, пленок и частиц,
действие — полезное или вредное,
место действия — всюду на Земле.

И В КОСМОСЕ — ТО ЖЕ

Новейшие достижения научно-технической мысли, как в фокусе, сконцентрированы в словах «освоение Космоса». Успехи электроники, автоматики, материаловедения, приборостроения и многих других отраслей промышленности нашли свое воплощение в космической технике. Ее создателям приходится считаться со всем многообразием физических и физико-химических явлений, в том числе и с адгезией. Различные виды адгезии, во-первых, широко применяют при создании космической техники, а во-вторых, они проявляются в условиях космических полетов.

Внешняя поверхность космических аппаратов имеет специальную обшивку, покрытую пленками. К качеству этих пленок, в частности к их адгезии, предъявляются более жесткие требования, чем к пленкам, применяемым внутри кабины корабля. Наружные пленки выдерживают большой перепад температуры. На активном участке траектории, при выведении космического корабля на орбиту, в результате трения температура обшивки может достигать тысячи градусов, а во время полета она снижается до -150°C . И только высокое качество внешней обшивки корабля, ее надежная адгезия могут обеспечить противодействие такому значительному перепаду температуры.

Для двигателя ракеты, работающего в условиях вакуума и значительных колебаний температур, используется жидкое топливо, в состав которого входят окислители. Поэтому здесь первостепенное значение приобретает подбор соответствующих смазок для трущихся деталей двигателя в условиях агрессивной среды. В качестве смазки в условиях вакуума используют твердые материалы, в результате адгезии частиц которых между трущимися поверхностями образуется тонкий прочно прилипший слой. Такой слой твердых смазочных материалов может получаться, например, из графита, дисульфида молибдена или соединений фтора. Этот слой выдерживает колебания температуры, глубокий вакуум и воздействие агрессивной среды. При хранении топлива, заправке им ракеты и в любых других случаях использования его в двигателях необходимо, в частности, учитывать взаимодействие жидкого топлива и твердых поверхностей, т. е. адгезию топлива.

Одежда космонавта состоит из специального комбинезона и шлема, в которые вмонтированы различные устройства для обеспечения связи и контроля состояния, а также создания необходимых условий жизнедеятельности организма космонавта. Одежда должна быть безопасной в пожарном отношении и удовлетворять требованиям гигиены. Комбинезон изготавливается из специального многослойного материала; адгезия различных слоев между собой и к основе соединяет слои в единое целое.

Не имея возможности проанализировать роль адгезии во всех отраслях космической техники, остановимся более подробно только на одной проблеме — микроминиатюризации электронной аппаратуры. Уменьшение массы и размеров электронной аппаратуры имеет общее значение, но особенно важно для космических кораблей. Вместо электронных ламп, конденсаторов, сопротивлений и других деталей электронной аппаратуры, которые занимают сравнительно большой объем, применяют интегральные микросхемы. На основу наносят различные материалы, в результате адгезии которых к основе воспроизводится сложная схема электронной аппаратуры. В одном кубическом сантиметре современных интегральных схем содержится эквивалент нескольким тысячам конденсаторов, сопротивлений транзисторов и других деталей.

Условия практической невесомости в Космосе, возможно, позволят использовать силы адгезии для совершения полезной механической работы. В этом убеждают эксперименты с прибором «Поток», проведенные еще на станции «Салют-5». Прибор изготовлен из органического стекла и представляет собой две сферические полости 1 и 2 (рис. 4). Эти полости соединены между собой тонкими капиллярными трубками, которые в нерабочем состоянии перекрыты клапаном 3. Поверхности каждой из сферических полостей обработаны по-разному: первая не смачивается жидкостью, и адгезия жидкости к ее поверхности минимальна; вторая, напротив, хорошо смачивается жидкостью, т. е. адгезия жидкости к этой поверхности будет максимальной. Капиллярная трубка, соединяющая полости, изготовлена из материала, который хорошо смачивается жидкостью. В условиях невесомости в результате повышенной адгезии к стенкам капиллярной трубки и ко второй полости и под действием сил поверхностного натяжения жидкость самопроизвольно перетекает из первой полости во вторую. Эксперимент с прибором «Поток»

подтверждает принципиальную возможность практического использования космических капиллярных насосов.

Особенности адгезии жидкости в условиях космического полета определялись во время эксперимента на приборе «Реакция». Цель этого эксперимента заключалась

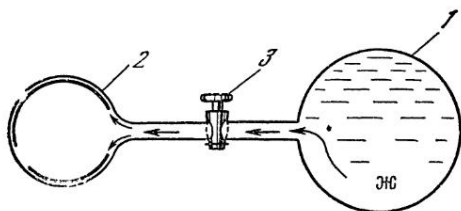


Рис. 4. Схема прибора «Поток» орбитальной станции «Салют-5»

- 1 — полость, плохо смачиваемая жидкостью;
- 2 — полость, хорошо смачиваемая жидкостью;
- 3 — клапан

в изучении смачивания, растекания и адгезии жидкого металла на твердой поверхности, в частности в зазоре между двумя трубчатыми соединениями. Подобное исследование, проведенное на примере расплава марганец-никелевого припоя, было необходимо для отработки технологии пайки трубчатых соединений и литья изделий из расплавов в невесомости.

Опыт работы приборов «Поток» и «Реакция» и последующие эксперименты на станциях «Салют-6» и «Салют-7» позволяют сделать вывод о том, что адгезия найдет применение в космической технологии.

НА ЛУНЕ

Поверхность Луны покрыта рыхлым слоем породы, называемой реголитом. Этот слой состоит из довольно мелких частиц, диаметром от 1 до 100 мкм, которые образуют лунную пыль. Для сравнения сопоставим размеры этих частиц с толщиной человеческого волоса: диаметр волоса женщин обычно составляет 20 мкм, а мужчин — несколько больше.

На долю реголита приходится примерно 82% поверхности Луны. Остальные 18% покрыты более крупными частицами, обломками и камнями, диаметр которых может превышать 1 мм и достигать нескольких метров. На поверхности Луны существует глубокий вакуум, который составляет 10^{-16} — 10^{-10} мм рт.ст., или $1,3 \cdot 10^{-14}$ — $1,3 \cdot 10^{-8}$ Па (Паскаль). Для сравнения заметим, что вакуум внутри обычной электрической лампочки составляет всего 10^{-3} мм рт.ст.

Две особенности лунной поверхности — наличие мелких частиц и глубокий вакуум — оказывают специфическое влияние на адгезию частиц.

Впервые в истории человечества космический корабль «Аполлон-11» прилунился 19 июля 1969 г. на плоской равнине, имеющей многочисленные мелкие кратеры. Верхний слой лунного грунта состоял из коричневого и серого пылеобразного материала. Нога астронавта погружалась в него на 12,5 мм. Мелкие частицы грунта, подобно угольной пыли на Земле, прочно прилипали к обуви.

Посадка следующего корабля «Аполлон-12» произошла в Океане Бурь. В этом районе глубина слоя реголита была значительно больше, чем на месте посадки корабля «Аполлон-11». Ноги астронавтов местами настолько глубоко погружались в пыль, что их приходилось высоко поднимать при ходьбе. Пыль обильно налипала на скафандр, обувь, костюм и на все предметы, которыми пользовались астронавты. Попытка стряхнуть пыль с костюма и очистить от нее другие предметы на Луне обычно не приводила к желаемым результатам. Это объясняется значительной адгезией частиц лунного грунта в условиях глубокого вакуума.

В вакууме поверхность освобождается от адсорбционных слоев газа, которые образуются на этих поверхностях в земных условиях. Поверхность как бы оголяется; это обуславливает непосредственный контакт частиц лунного грунта с поверхностью и усиление адгезии частиц на Луне. Не имея возможности очиститься, астронавты занесли в кабину корабля много запыленных предметов. После нескольких дней нахождения этих предметов в кабине корабля адгезия частиц настолько снизилась, что они либо самопроизвольно отставали от предметов, либо легко удалялись при помощи бытовых пылесосов. Уменьшение адгезии частиц в атмосфере космического корабля объясняется образованием адсорбционных слоев газа, в данном случае кислорода, на запыленной поверхности. Эти слои экранируют исходную поверхность и снижают адгезию частиц.

Корабль «Аполлон-12» совершил посадку в 330 м от аппарата «Сервейер-3», который был доставлен на Луну 2,5 годами ранее. Астронавты увидели узлы и детали этого аппарата, покрытые толстым слоем прилипшей лунной пыли. К ковшу, который был предназначен для забора проб лунного грунта, прилипло 6,5 г лунной пыли (взве-

шивание было проведено впоследствии в земных условиях).

Между частицами лунного грунта возникает аутогезия, которая количественно определяется величиной сцепления. Эта величина была измерена непосредственно на Луне при помощи автоматической станции «Луна-13», а также экипажем космического корабля «Аполлон-14». После доставки лунного грунта на Землю, т. е. в атмосферных условиях, проводили повторное измерение сцепления. И вот что оказалось. Если сцепление лунного грунта на Луне составляло $0,0015 \text{ кгс/см}^2$ ($1,5 \cdot 10^2 \text{ Па}$), то в земных условиях оно было равно нулю. Уменьшение сцепления в земных условиях, так же как и снижение адгезии частиц, объясняется формированием адсорбционных слоев газа. На Луне, в условиях вакуума, подобные слои отсутствуют, и взаимодействие между частицами лунного грунта больше, чем в земных условиях.

Плотность лунного грунта ниже плотности грунта Земли. Этим обстоятельством объясняются легкая перепакровка частиц и четкий след астронавтов на лунной поверхности. Взаимодействие между частицами лунного грунта и его уплотнение оказывают влияние на несущую способность, под которой подразумевают внешнее давление, выдерживаемое грунтом. Ее удалось измерить при помощи луноходов. Оказалось, что она составляет $0,34 \text{ кгс/см}^2$ ($3,4 \cdot 10^4 \text{ Па}$). Несущая способность грунта Земли превышает эту величину в десятки раз.

Незначительное уплотнение частиц лунного грунта проявляется при старте управляемых и неуправляемых аппаратов с поверхности Луны. Реактивная струя стартовых двигателей воздействует на грунт, в котором образуются кратеры, а вокруг них поднимается пылевое облако. Частицы пыли прилипают к различным предметам космического корабля, вызывая порой непредвиденные помехи. Так, при кратковременном включении двигателя «Сервейера-5» лунная пыль прилипла к зеркалу телекамеры и к поверхности головки датчика альфа-радиометра. Позолоченная поверхность этого датчика в результате адгезии лунной пыли стала матовой и темно-серой.

С полным основанием можно добавить к нашему знакомству с адгезией следующее:

место действия: всюду — на Земле и в Космосе.

ВОДНЫЕ ЛЫЖИ И ЖИДКИЙ МЕТАЛЛ

Вряд ли кто не восторгался при виде прекрасного зрелища — спортсменов на водных лыжах. Все больше поклонников находит этот замечательный вид спорта. Для скольжения по воде на водных лыжах необходимы значительная скорость движения спортсмена, обеспечивающая подъемную силу, и определенные свойства воды, находящейся на границе с воздухом и образующей зеркально-гладкую поверхность водоема.

Водные лыжи — это спорт и отдых. Зато поведение расплавов металлов на границе с газовой или воздушной средой существенно определяет такие технологические процессы в металлургии, как разлив металла, литье, спекание в порошковой металлургии, пайку и металлизацию поверхности, использование жидких металлов как теплоносителей в энергетических установках и в других случаях. Между тем свойства поверхностей жидкостей — и воды, и металлов — подчиняются одним и тем же законам.

Физико-химические свойства поверхности раздела фаз резко отличаются от свойств внутренних частей системы. Подобное отличие имеет место на границе раздела жидкость—газ, в том числе на границе вода—воздух.

Для рассмотрения количественных показателей, характеризующих адгезию жидкости, необходимо прежде всего остановиться на характеристике свойств поверхности границы раздела.

Взаимодействие молекул жидкости схематически показано на рис. 5. В глубине жидкости молекулы А окружены со всех сторон себе подобными молекулами, действие которых взаимно компенсируется. Молекулы на поверхности одновременно взаимодействуют с молекулами жидкости и газа (воздуха). Воздействие молекул жидкой фазы на молекулу Б значительно превышает воздействие со стороны молекул газовой фазы. Поэтому молекулы, находящиеся на поверхности жидкости, будут втягиваться внутрь жидкости. В результате поверхность жидкости стремится сократиться до минимального значения в данных условиях. Если на поверхности жидкости образуется гребень В, то молекулярное притяжение распрямит его и поверхность жидкости будет идеально гладкой.

Неравноценность молекулярного взаимодействия на границе раздела фаз и втягивание поверхностных молекул внутрь жидкости вызывают появление силы. Эта сила

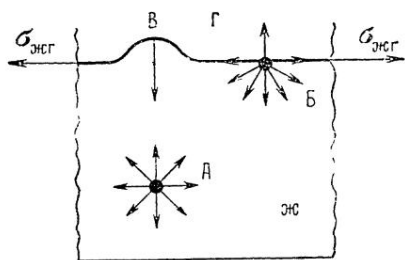


Рис. 5. Схема образования поверхностного натяжения

А — молекула внутри жидкости; Б — молекула на поверхности; В — гребень на поверхности

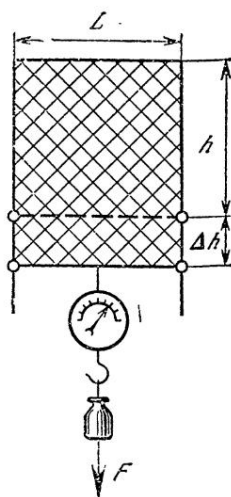


Рис. 6 Рамка с двусторонней пленкой жидкости

действует тангенциально, рассчитывается на единицу длины периметра, ограничивающего поверхность жидкости, и называется поверхностным натяжением. Поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой обозначено на рис. 5 через $\sigma_{жг}$.

Еще раз подчеркнем, что поверхностное натяжение вызвано особенностями взаимодействия молекул в поверхностном слое жидкости. Поверхностное натяжение действует тангенциально к поверхности жидкости. В результате поверхностный слой жидкости будет всегда ровный и гладкий, на нем отсутствуют выступы. Поверхностное натяжение имеет размерность Н/м, или дин/см. Для воды оно равно при 20°C $72,75 \cdot 10^{-3}$ Н/м, или 72,75 мН/м (миллиньютон на метр).

Для уяснения сути поверхностного натяжения обратимся к простому опыту, схема которого приведена на рис. 6. Рамку с одной подвижной стороной погружают в мыльный раствор. После извлечения рамки из раствора на ней формируется двусторонняя жидкая пленка.

На каждую сторону пленки действует тангенциально к ней поверхностное натяжение $\sigma_{жг}$. В результате подвижная рамка подвергается воздействию силы, равной $2\sigma_{жг}L$. Коэффициент 2 фигурирует потому, что жидкая пленка находится с двух сторон рамки. Для компенсации действия поверхностного натяжения к подвижной части

рамки следует приложить силу F , равную

$$F = 2\sigma_{\text{жг}}L, \quad \sigma_{\text{жг}} = F/2L. \quad (3)$$

Согласно условию поверхностное натяжение есть сила, которая действует на единицу длины рамки по границе раздела между жидкостью и газом (воздухом).

Именно поверхностное натяжение, создавая гладкую ровную поверхность, предоставляет возможность любителям водных лыж скользить по воде. Поверхностное натяжение можно наблюдать и в других случаях. Так, под действием поверхностного натяжения вода, вытекающая из водопроводного крана, сохраняет компактную форму струи.

Понятие о поверхностном натяжении неразрывно связано с представлением об удельной свободной поверхностной энергии. Для увеличения поверхности жидкости и образования новой поверхности необходимо затратить работу на перемещение молекул жидкости из глубины на поверхность. Эта работа в расчете на единицу площади поверхности жидкости и есть удельная свободная поверхностная энергия. Для однокомпонентной жидкости, состоящей из одного вещества, удельная свободная поверхностная энергия численно равна поверхностному натяжению. Обе эти величины обозначим $\sigma_{\text{жг}}$.

Смысл удельной свободной поверхностной энергии можно пояснить при помощи рис. 6. Энергия, необходимая для образования двусторонней жидкой пленки ΔW , равна произведению удельной свободной поверхностной энергии на площадь вновь образованной пленки, т. е.

$$\sigma_{\text{жг}}\Delta S = \Delta W, \quad (4) \quad \sigma_{\text{жг}} = \Delta W/\Delta S. \quad (5)$$

Условие (5) показывает, что величина $\sigma_{\text{жг}}$ есть работа образования единицы поверхности.

Затрата работы на преодоление действия поверхностного натяжения и на перемещение подвижной части рамки равна $\Delta W = F\Delta h$. С учетом того, что $\Delta S = 2L\Delta h$, из соотношения (5) получим

$$2L\Delta h\sigma_{\text{жг}} = F\Delta h. \quad (6)$$

Левая часть уравнения (6) характеризует работу образования поверхности жидкости, а правая — работу, связанную с растяжением жидкости под воздействием поверхностного натяжения. Работа образования поверхности жидкости и работа, потребная для ее растяжения, равны между собой. Уравнение (6) справедливо для жидкости.

Нетрудно видеть, что выражение (5) идентично условию (3). Мы видим, что величину $\sigma_{\text{жг}}$ можно рассматривать как энергию, отнесенную к единице поверхности (площади), и как силу, отнесенную к единице длины периметра поверхности. С точки зрения размерностей это одно и то же. Действительно,

$$\sigma = \frac{\text{энергия}}{\text{площадь}} = \frac{R}{S} = \frac{ml^2 t^{-2}}{l^2} = \frac{mlt^{-2}}{l} = \frac{F}{l} = \frac{\text{сила}}{\text{длина}}.$$

Таким образом, размерность удельной свободной поверхностной энергии — Дж/м², а размерность поверхностного натяжения — Н/м. Для воды и в общем случае для однокомпонентной жидкости численные значения поверхностного натяжения удельной свободной поверхностной энергии равны между собой.

У жидкостей, в состав которых входит несколько веществ, подобное совпадение отсутствует. Различие между поверхностным натяжением и удельной свободной поверхностной энергией незначительно, и в большинстве случаев эти понятия отождествляют.

Иногда для подчеркивания энергетического аспекта в образовании новой поверхности размерность поверхностного натяжения дают в мДж/м².

Понятия о поверхностном натяжении и об удельной свободной поверхностной энергии справедливы для любых конденсированных тел, в том числе и для твердого тела, граничащего с газом или жидкостью.

Образование новой поверхности можно условно представить в виде двух стадий. На первой стадии после деления вещества на части молекулы у поверхности находятся в том положении, которое они занимали ранее в объеме. В процессе второй стадии молекулы на поверхности перегруппировываются и занимают равновесное положение. В жидкости обе стадии реализуются одновременно и быстро, а в твердом теле вторая стадия может идти очень медленно или совсем отсутствовать.

В результате образующиеся поверхности твердого тела становятся неоднородными: возникают неровности и имеет место различное расположение молекул на границе раздела фаз. Поэтому работа, затрачиваемая на образование единицы поверхности, т. е. удельная свободная поверхностная энергия, в различных местах твердой поверхности будет неодинакова. Неоднородность поверхности твердого тела и ограниченная подвижность молекул этих

тел сказываются также на поверхностном натяжении. Удельную свободную поверхностную энергию и поверхностное натяжение для них имеет смысл рассматривать или в точке, или как некоторые усредненные величины. На практике считают, что поверхностное натяжение и удельная свободная поверхностная энергия твердых тел численно совпадают.

Заметим, что удельная свободная поверхностная энергия не является особой формой энергии, а представляет тот избыток энергии в расчете на единицу поверхности, которым обладают молекулы на поверхности в связи с их положением.

Помимо удельной различают свободную поверхностную энергию. Если термин «удельная» относится к единице площади поверхности, то термин «свободная» — ко всей поверхности. При этом слово «поверхностная» обычно опускают, подразумевая, что свободная энергия относится к поверхности раздела фаз.

Для уяснения сути свободной энергии еще раз обратимся к рис. 5. Молекула Б поверхностного слоя взаимодействует со своими соседями, находящимися в нижней половине пространства, которое рассекается поверхностью жидкости. У этой молекулы в отношении верхней половины пространства сохранилась такая же способность взаимодействия, какая реализована лишь для нижней половины. Для всех молекул поверхностного слоя нереализованная способность к взаимодействию и будет характеризовать свободную энергию, которая, как мы видим, равна энергии образования поверхностного слоя. При увеличении или уменьшении поверхности раздела фаз *изменение свободной энергии* точно равно произведению удельной свободной поверхностной энергии (поверхностного натяжения) на изменение площади поверхности.

Жидкость всегда находится в равновесии с собственным паром. Когда воздействие на молекулы в поверхностном слое жидкости со стороны молекул пара будет таким же, как со стороны жидкости, то поверхностное натяжение становится равным нулю. Молекулы на поверхности будут испытывать аналогичные действия соседних молекул как со стороны пара, так и со стороны жидкости. Это будет означать, что граница раздела между фазами исчезает и система из гетерогенной, имеющей в данном случае две фазы, превратилась в гомогенную, т. е. состоящую из одной фазы. Поэтому величина поверхностного натяжения

является мерой гетерогенности системы, причем не только газ—жидкость, но и жидкость—жидкость.

При увеличении концентрации пара растет взаимодействие его молекул с молекулами жидкости, величина поверхностного натяжения снижается. Это происходит с повышением температуры. При температуре кипения поверхностное натяжение падает до минимального значения. Чем меньше поверхностное натяжение, тем более существенным для системы является взаимодействие молекул, находящихся на границе раздела фаз.

Незначительные поверхностные натяжения сжиженных газов, которые применяют в качестве компонент ракетного топлива, характеризуют их нестабильность. Так, поверхностное натяжение сжиженного кислорода составляет 13,0 мДж/м², а сжиженного водорода — всего 2,25 мДж/м². В связи с этим на практике приходится применять дополнительные меры для сохранения гетерогенности систем, состоящих из сжиженных газов.

В противоположность сжиженным газам расплавы металлов имеют значительные поверхностные натяжения в пределах 100—1000 мДж/м². Подобные значения поверхностного натяжения, как это будет показано далее, оказывают влияние на адгезию жидкого металла.

Для измерения величины поверхностного натяжения на границе раздела жидкости с газовой (воздушной) средой $\sigma_{жг}$ разработан ряд доступных методов.

Спортсмен на водных лыжах, порой не подозревая о существовании поверхностного натяжения, все время ощущает его действие. Стоит ему сделать неосторожное движение, скольжение по поверхности прекращается, и воднолыжник превращается в пловца.

ОДНА ИЗ ЗАГАДОК КОСМОСА

Некомпенсированность молекулярного взаимодействия (см. рис. 5), стремление молекул поверхностного слоя втягиваться во внутрь жидкости, а также вызванное этим поверхностное натяжение жидкости на границе с другой жидкостью ($\sigma_{жж}$) или с газовой средой ($\sigma_{жг}$), как уже отмечалось, стремятся сократить поверхность жидкости до минимальных размеров. Наименьшей поверхностью при данном объеме обладает сфера. Сферическую поверхность можно наблюдать у относительно малых капель некоторых жидкостей, например ртути, на стекле, покрытом па-

рафином. Небольшие капли дождя и росы на листьях могут иметь поверхность, близкую к сферической.

Сферическая форма получается и в том случае, если каплю одной жидкости поместить в другую, не смешивающуюся с ней жидкость равной плотности. Так ведут себя, например, капли масла в смеси спирта с водой, капли нитробензола или анилина в водном растворе солей. В земных условиях все же сферическая форма капли жидкости получается редко: земное притяжение искажает ее.

В Космосе, в отсутствие земного притяжения, капли жидкости принимают сферическую форму. Тот, кто наблюдал по телевидению репортажи из Космоса о полетах орбитальных станций «Салют», мог видеть сферические капли воды, перемещающиеся в кабине космического корабля. Образование сферических капель в условиях невесомости является следствием действия поверхностного натяжения жидкости на границе с воздушной средой, т. е. величины $\sigma_{жг}$.

Воздействие поверхностного натяжения в условиях Космоса было положено в основу эксперимента на приборе «Сфера», проведенного еще на станции «Салют-5». В качестве объекта исследования был использован сплав висмута, свинца, олова и кадмия — так называемый сплав Вуда. Отличительная особенность этого сплава — сравнительно низкая температура плавления (68°C).

В приборе «Сфера» заготовки сплава Вуда помещались в цилиндрический канал, который имел электрический обогрев. При включении обогрева быстро происходило расплавление материала и образовывались капли. Эти капли под действием поршня вытеснялись в кабину космического корабля. Находясь в свободном состоянии и в условиях невесомости, капли расплава под действием поверхностного натяжения принимали сферическую форму. Температура в кабине корабля была ниже температуры плавления этого материала. Поэтому капли при полете затвердевали, и в таком состоянии их собирали в лавсановый мешок. По существу зарождалась новая технология получения шарообразных частиц в условиях Космоса.

Однако анализ доставленных на Землю частиц показал, что они были не сферической, а эллипсоидной формы; поверхность самих частиц представляла собой сложный рельеф. Что же произошло? Неизвестное проявление сил поверхностного натяжения при переходе жидкости в твердую фазу? А может быть, неполное исключение влияния

сил тяжести в условиях космического полета? Если на Земле это влияние определяется ускорением земного притяжения, которое равно g , то на борту космического корабля в результате различных причин (включение ориентационных двигателей, вибрация и др.) оно имеет порядок 10^{-4} единиц земного ускорения (g). Хотя эта величина незначительна, но она может оказать влияние на формирование поверхности частиц из капель.

Впоследствии на станции «Салют-6» была уточнена гравитационная обстановка и определен уровень реальной гравитации на борту станции в течение суток. Стало ясно, что в конкретных условиях орбитальной станции следует говорить не только о невесомости, но и о микрогравитации. Возможно, что эллипсоидная форма частиц образовалась в результате вращения капель расплава в кабине космического корабля.

На рельеф поверхности частиц могут оказать влияние особенности фазового перехода в условиях невесомости. После затвердевания расплава вместо границы раздела жидкость—газ возникает новая — твердая поверхность—газ. На поверхность расплава действует поверхностное натяжение $\sigma_{жг}$, а при образовании твердого тела возникает поверхностное натяжение $\sigma_{тг}$. Между этими двумя величинами возможно несоответствие. Не исключено, что изменение формы частиц может быть связано с различием между поверхностным натяжением и удельной свободной поверхностной энергией применительно к твердому телу. Может быть, и в этом кроется причина образования сложного рельефа поверхности твердых частиц в кабине космического корабля при застывании сферических частиц сплава Вуда? Эксперименты продолжаются. Они позволят уточнить роль поверхностных явлений при изменении свойств граничных фаз в условиях космического полета.

ЛЕБЕДЬ, РАК И ЩУКА

Поверхностное натяжение определяет не только форму капли, но и адгезию жидкости. Обратим внимание на поведение капли воды или какой-либо жидкости на поверхности твердого тела.

В качестве иллюстрации используем известные народные пословицы. Для того чтобы показать способность человека избежать справедливого упрека или даже наказа-

ния, говорят, что он может выйти «сухим из воды». Бесполезность внушения и упреков подчеркивают выражением «как с гуся вода». В том и другом случае речь идет о такой поверхности, с которой капли воды стекают, не задерживаясь на ней. Подобные свойства создает слой жира. Чтобы человеку выйти сухим из воды в буквальном смысле, необходимо подвергнуть его кожу такой обработке, после которой капли воды скатывались бы с нее.

Возможность удаления капель воды с твердой поверхности определяется формой капли. Различные формы капель на поверхности показаны на рис. 7. Капли, форма которых близка к сферической (рис. 7, в), легче удаляются с поверхности. Чаще капли все же более или менее растекаются по поверхности (рис. 7, б). Подобные капли удаляются труднее. Что же заставляет капли жидкости принимать различную форму на твердой поверхности? Для ответа на этот вопрос необходимо рассмотреть условия нахождения капель на этих поверхностях.

Форма капли на твердой поверхности зависит от тех взаимодействий, которые имеют место на границе раздела фаз. Как было показано ранее (см. рис. 5), это взаимодействие характеризуется поверхностным натяжением. Причем необходимо учитывать не только поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом, но и поверхностные натяжения на границе жидкости с твердым телом и газовой средой.

Таким образом, положение капли определяется значениями поверхностных натяжений на границе раздела следующих фаз: жидкость—газ (воздух) — $\sigma_{жг}$, жидкость—твердая поверхность или твердая поверхность—жидкость — $\sigma_{т.к}$ и твердая поверхность—газ (воздух) — $\sigma_{тг}$. Равновесие капли определяется одновременным воздействием этих трех поверхностных натяжений. По периметру контакта капли с твердым телом действуют три поверхностных натяжения: $\sigma_{тг}$, $\sigma_{т.к}$ и $\sigma_{жг}$, которые представлены на рис. 7 в виде векторов. Они направлены по касательной к соответствующей поверхности. Поверхностные натяжения действуют на каплю воды подобно лебедю, раку и щуке, запряженным в одну упряжку.

Поверхностное натяжение на поверхности жидкости с газовой средой $\sigma_{жг}$ можно уподобить действию лебедя. Поверхностное натяжение жидкости стремится уменьшить поверхность капли. Это стремление приводит к снижению поверхности капли до превращения капли в шар.

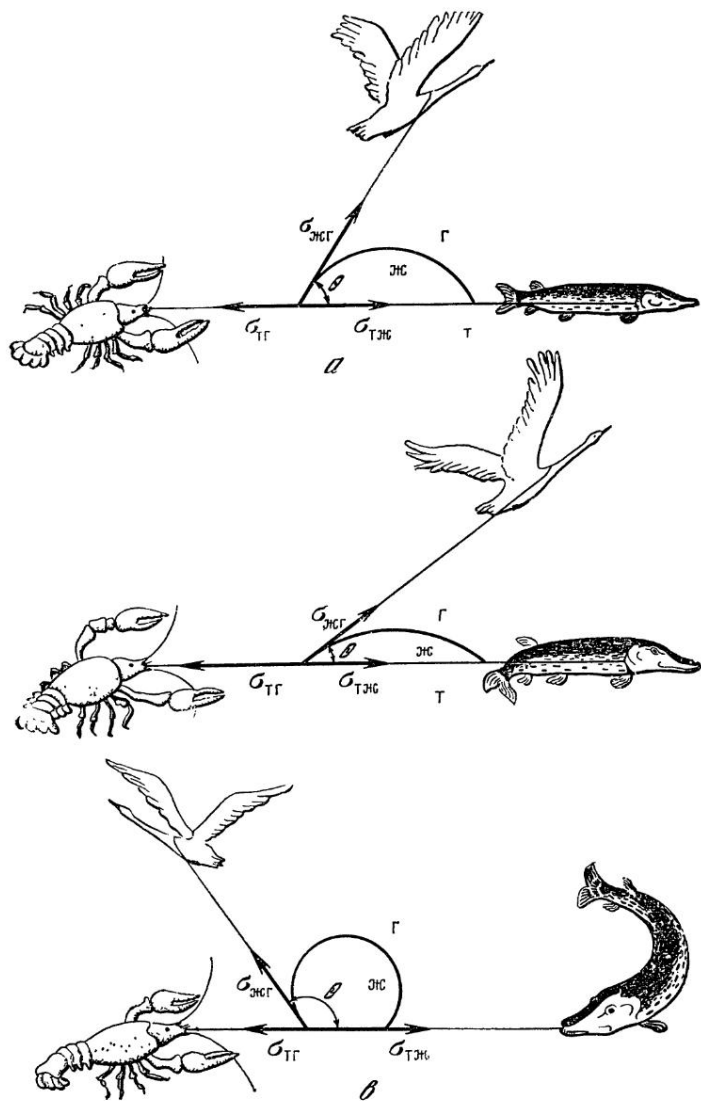


Рис. 7. Положение капли на поверхности

а — исходное; б — после уменьшения краевого угла; в — после увеличения краевого угла

Поверхностное натяжение на границе раздела жидкости с твердым телом $\sigma_{тж}$, подобно щуке, стремится сократить площадь контакта жидкости и препятствовать растеканию капли. Сокращение площади контакта ведет к образованию сферической поверхности капли.

Рак олицетворяет в нашем случае поверхностное натяжение твердого тела на границе с газовой средой $\sigma_{тг}$.

Обратите внимание на направление действия несовместимых партнеров. Щука и рак, как и полагается, во всех случаях, представленных на рис. 7, действуют в противоположных направлениях. Именно этим и характеризуется силовое воздействие на каплю поверхностных натяжений $\sigma_{тж}$ и $\sigma_{тг}$: они действительно лежат на одной прямой, но направлены в разные стороны.

А вот лебедь, оторвавшись от своих партнеров, действует на каплю под некоторым углом к поверхности ее контакта. Причем в двух случаях, изображенных на рис. 7, а, б, сила поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$ направлена в ту же сторону, что и поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом $\sigma_{тж}$. Лебедь как бы помогает поверхностному натяжению $\sigma_{тж}$ уменьшить площадь контакта и облегчить свертывание капли.

На рис. 7, в направление поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$ уже не совпадает с направлением поверхностного натяжения на границе жидкости с твердым телом $\sigma_{тж}$. Лебедь помогает в данном случае не щуке, а раку, но помощь его не достигает цели. Капля не растекается. Дело в том, что подобное положение возникает тогда, когда поверхностное натяжение $\sigma_{тг}$ незначительно. Поэтому даже совместное усилие лебедя и рака не в состоянии обеспечить растекание капли.

Еще раз отметим, что действие лебедя, т. е. поверхностного натяжения жидкости на границе с газовой средой, направлено под определенным углом к площади контакта. Этот угол называют краевым углом смачивания и обозначают обычно через θ . Часто для сокращения вместо «краевой угол смачивания» говорят просто «краевой угол».

Краевой угол — важнейшая характеристика смачивания. Он определяется значением угла между направлением поверхностного натяжения жидкости на границе с газовой средой $\sigma_{жг}$ и двумя другими. Вершина этого угла лежит на периметре, ограничивающем площадь контакта капли с твердым телом, а его значение всегда отсчитывает-

ся в сторону жидкой фазы. Величина краевого угла достаточно просто определяется экспериментально; легко видеть ее диапазон: от полного смачивания (0°) до 180° .

Вернемся еще раз к рис. 7. Краевой угол непосредственно связан с площадью контакта капли. Достаточно сравнить рис. 7, *a* и *в*. Чем меньше величина угла, тем больше площадь контакта капли. С ростом площади контакта капли увеличивается смачивание жидкостью твердого тела. Адгезия и смачивание — это две стороны одного и того же явления, возникающего при взаимодействии жидкости с твердым телом. Адгезия обуславливает связь между твердым телом и контактирующей с ним жидкостью, а смачивание — результат подобной связи. Краевой угол определяет способность твердых тел смачиваться.

По величине краевого угла все поверхности, контактирующие с водой, принято делить на две группы. Если угол θ лежит в пределах от 0 до 90° , то такие поверхности называют гидрофильными. Поверхности называются гидрофобными, когда величина краевого угла капли воды превосходит 90° . На рис. 7, *a*, *б* изображены гидрофильные, а на рис. 7, *в* — гидрофобная поверхность.

Гидрофильность и гидрофобность характеризуют особенности взаимодействия воды с твердыми поверхностями. Гидрофильность означает сродство, выражающееся в интенсивном взаимодействии между собой молекул воды и твердого тела. В случае гидрофобности подобное взаимодействие отсутствует или является минимальным.

На предельно гидрофильной поверхности краевого угол становится равным нулю. На подобных поверхностях вода полностью растекается, т. е. на таких поверхностях она под действием поверхностного натяжения твердого тела $\sigma_{тг}$ превращается в пленку. На границе раздела жидкость—воздух в этих условиях отсутствует характерная сферическая форма поверхности.

Полное растекание, например, наблюдается после нанесения масла на раскаленную сковороду или при попадании капли бензина на различные поверхности. Полное растекание на алюминиевых поверхностях происходит в отношении компонентов, применяемых в качестве ракетного топлива, таких, как перекись водорода, азотная кислота и двуокись азота. Обычно полное растекание капель воды наблюдать трудно. При добавлении в воду моющего порошка можно добиться растекания капли в пленку.

На предельно гидрофобных поверхностях краевой угол по отношению к капле воды должен достигать 180° . Однако таких поверхностей, как на это обращал внимание П. А. Ребиндер, в природе нет. К предельно гидрофобным близки такие материалы, как воск, парафин, стеарин. Краевой угол капль воды на этих поверхностях в обычных условиях не превышает 120° .

На предельно гидрофобных поверхностях очень мала площадь контакта капль воды. На таких поверхностях адгезия капль незначительна, и поэтому капли воды без труда стекают. Для выхода сухим из воды кожа человека должна быть предельно гидрофобной. Этот предельный случай и подчеркивается выражением «как с гуся вода». Чисто вымытая кожа человека гидрофильна. В этом легко убедиться: человеку невозможно выйти сухим из воды.

Краевые углы и в настоящее время широко используются для оценки смачивания. Однако этот показатель недостаточен, так как при смачивании водой тел различной природы различия краевых углов иногда слишком малы. Для увеличения различий предложено оценку краевых углов проводить в условиях избирательного смачивания, когда капля воды граничит не с газовой или воздушной средой, а с другой жидкостью. В качестве жидкости, отличающейся по своим свойствам от воды, применяют углеводороды, в частности бензол. Наличие двух жидкостей позволяет более резко выявить природу твердых поверхностей. Так, на графите краевой угол капли воды, граничащей с воздухом, составляет 60° , а в условиях избирательного смачивания он увеличивается до 125° . Поэтому гидрофильность и гидрофобность поверхностей правильнее оценивать в условиях избирательного смачивания.

Твердые поверхности могут смачиваться не только водой и водными растворами, а также органическими жидкостями. В случае смачивания поверхностей органическими жидкостями используют приставку «олео» вместо «гидро». Когда краевой угол лежит в пределах от 0 до 90° , то поверхности по отношению к смачиванию органическими жидкостями называют олеофильными в противоположность олеофобным поверхностям при краевом угле в диапазоне $90-180^\circ$.

Краевой угол определяет смачивание в условиях равновесия, при отсутствии загрязнения на поверхности и при соблюдении ряда других факторов. Кроме того, форма

капли и краевой угол зависят от ее массы. В земных условиях величина краевых углов постоянна только для массы капель, изменяющейся в определенном диапазоне в зависимости от величины поверхностного натяжения. При увеличении массы капель гравитационное поле искажает форму капли, что на гидрофобной поверхности приводит к снижению краевого угла. Даже капли ртути на тefлоне не сферичны, а слегка эллипсоидальны. В Космосе подобное искажение краевого угла отсутствует.

Для одних и тех же контактирующих партнеров твердая поверхность—жидкость значения краевых углов изменяются в зависимости от наличия загрязнений и примесей, температуры и других факторов. Поэтому понятия гидрофильность и гидрофобность, а также олеофильность и олеофобность являются относительными. Эти понятия можно применять для характеристики тенденции смачивания. Гидрофобизация поверхности связана с увеличением краевого угла. Напротив, гидрофилизация предполагает снижение краевого угла.

Итак, величина краевого угла отражает условия нахождения капель жидкости на твердых поверхностях и смачивание этих поверхностей.

А ВОЗ И НЫНЕ ТАМ

При помощи краевого угла можно оценить смачивание и несмачивание различных поверхностей. Наиболее полно положение капли на твердой поверхности характеризуют четыре величины: поверхностные натяжения на границе раздела фаз $\sigma_{тг}$, $\sigma_{тж}$ и $\sigma_{жг}$ и связанный с ними краевой угол θ .

Для рассмотрения связи между этими величинами проанализируем условие равновесия капли жидкости на твердой поверхности. На единицу длины периметра смачивания действуют три силы — поверхностные натяжения $\sigma_{тг}$, $\sigma_{тж}$ и $\sigma_{жг}$, направленные касательно к соответствующим поверхностям раздела. Поверхностные натяжения являются векторными величинами (см. рис. 7, а). Эти величины в условиях равновесия должны быть взаимно компенсированы с учетом их направления. Силы $\sigma_{тг}$ и $\sigma_{тж}$ действуют в плоскости поверхности твердого тела; сила $\sigma_{жг}$ направлена к этой плоскости под углом θ . Проекция силы $\sigma_{жг}$ на плоскость равна $\sigma_{жг} \cos \theta$. В связи с этим условие равновесия капли можно выразить следующим

уравнением:

$$\sigma_{\text{ТГ}} = \sigma_{\text{ТЖ}} + \sigma_{\text{ЖГ}} \cos \theta. \quad (7)$$

Из уравнения (7) можно получить два других, а именно:

$$\sigma_{\text{ЖГ}} \cos \theta = \sigma_{\text{ТГ}} - \sigma_{\text{ТЖ}}, \quad (8)$$

$$\cos \theta = (\sigma_{\text{ТГ}} - \sigma_{\text{ТЖ}}) / \sigma_{\text{ЖГ}}. \quad (9)$$

Рассмотрим более подробно физический смысл уравнений (7)—(9). Еще раз воспользуемся рис. 7, б. Поверхностные натяжения на границе раздела фаз уподоблены лебедю, раку и щуке. Каждый из них действует исходя из своих собственных побуждений. Выражение «а воз и ныне там» означает, что усилия случайных компаньонов уравновешиваются. Подобное равновесие возникает по отношению к капле жидкости в результате действия различных поверхностных натяжений. Капля принимает форму, которая характеризуется определенным значением краевого угла.

При помощи уравнения (9) можно определить условия контакта капли на гидрофобных и гидрофильных поверхностях. На гидрофильной поверхности краевого угол меняется в пределах от 0 до 90°, а $\cos \theta$ — соответственно от 1 до 0. Величина $\cos \theta$, которая определяет условие растекания капли, зависит от поверхностного натяжения жидкости на границе с газовой средой.

Чем меньше значение поверхностного натяжения $\sigma_{\text{ЖГ}}$, тем значительнее растекание капли по твердой поверхности. Сопоставим, к примеру, растекание капель воды и бензина. Вода имеет поверхностное натяжение $\sigma_{\text{ЖГ}}$ 72,75 мДж/м² (20° С), а бензин в этих условиях в зависимости от качества — примерно 30 мДж/м². Капля бензина, имеющего меньшее поверхностное натяжение, в соответствии с уравнением (9) будет реализовать большее значение $\cos \theta$ или меньший краевой угол, т. е. капля бензина будет легче растекаться по сравнению с каплей воды.

На гидрофильных поверхностях величина $\cos \theta$ положительна. Это означает, что на основании уравнения (9) $\sigma_{\text{ТГ}} > \sigma_{\text{ТЖ}}$. Иными словами, поверхностное натяжение твердого тела на границе с газовой средой $\sigma_{\text{ТГ}}$ больше поверхностного натяжения этого тела с жидкостью $\sigma_{\text{ТЖ}}$ и способствует растеканию капли.

На гидрофобных поверхностях $\cos \theta$ имеет отрицательное значение. Тогда в соответствии с уравнением (9) мож-

по написать $\sigma_{\text{ТЖ}} > \sigma_{\text{ТГ}}$. Поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом $\sigma_{\text{ТЖ}}$ превышает поверхностное натяжение этого тела с газовой средой $\sigma_{\text{ТГ}}$ и стремится свернуть растекающиеся капли жидкости и придать им сферическую форму (см. рис. 7, в).

Итак, основные величины, характеризующие свойства граничащих фаз — поверхностные натяжения и краевого угол, взаимосвязаны. Краевой угол, т. е. смачивание или несмачивание твердых тел, определяется поверхностными натяжениями на границе раздела фаз.

РАСТИТЕЛЬНЫЙ МИР И СТРОИТЕЛЬСТВО

Адгезия между жидкостью и твердой поверхностью возникает всегда, но не во всех случаях она будет иметь определяющее значение. Вы пьете газированную воду. Между газированной водой и материалом стакана возникает адгезия. Ее действие, однако, не имеет последствий. На внутренней поверхности стакана отсутствуют остатки газированной воды или, во всяком случае, их не так много; впоследствии они легко удаляются.

А теперь представим себе, что вы отведали куриного или мясного бульона. Находящийся в воде жир смачивает поверхность тарелки, застывает и в результате адгезии прочно закрепляется. Для удаления слоя жира тарелки моют горячей водой с применением моющих средств.

В домашних условиях адгезия жидкости все же является сопутствующим процессом, а в некоторых производственных условиях она становится определяющим. К числу таких производств относится добыча нефти.

Адгезия нефти к частицам породы влияет на условия нахождения нефти в недрах земли. Нефтяной пласт представляет собой сложную многокомпонентную структуру, состоящую из отдельных пор, которые заполнены нефтью. Для вытеснения нефти из этих пор используют различные способы, основанные на создании внешнего давления. В частности, в породу нагнетают воду. В результате преодолевается адгезия нефти, капли и струйки сливаются в единый поток, который направляется к поверхности земли.

Особое значение приобретает положение жидкости на границе раздела трех фаз. При соприкосновении жидкости с твердой поверхностью в присутствии газовой (воздушной) среды имеют место краевые эффекты.

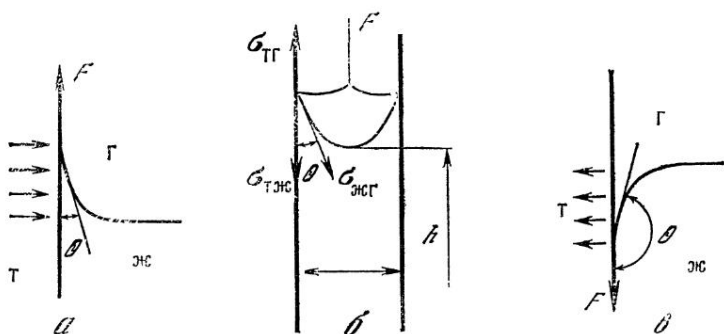


Рис. 8. Контакт жидкости с поверхностями

a — гидрофильной; *б* — гидрофильной капилляра; *в* — гидрофобной. Стрелками показано взаимодействие жидкости с твердой поверхностью

Повышенное взаимодействие жидкости с гидрофильными или олеофильными поверхностями (рис. 8, *a*) приводит к тому, что возникает сила F , направленная вверх и способствующая подъему части жидкости. В случае значительной массы жидкости сила F способна поднять только небольшой слой жидкости, непосредственно соприкасающийся с поверхностью. Когда жидкость заключена в сосуд, имеющий незначительные капиллярные размеры, то сила F в состоянии поднять жидкость на определенную высоту (рис. 8, *б*). По отношению к несмачиваемым поверхностям (рис. 8, *в*) взаимодействие жидкости отсутствует или является минимальным. В этих условиях возникает сила F , которая уже направлена вниз и увлекает за собой часть жидкости, находящейся у твердой поверхности.

Значение силы F в капилляре можно определить при помощи следующего уравнения:

$$F = 2\sigma_{\text{ЖГ}} \cos \theta / r. \quad (10)$$

Необходимыми условиями возникновения силы F , направленной вверх (см. рис. 8, *б*), являются незначительный радиус пор r , вогнутая форма поверхности жидкости и хорошая смачиваемость, т. е. гидрофильность поверхности. Последнее, как уже отмечалось, означает, что величина краевого угла должна быть близка к нулю, а его косинус — стремиться к максимальному значению, т. е. к единице.

На смачиваемой поверхности сила F обеспечивает капиллярное поднятие жидкости на высоту h , значение которой равно:

$$h = 2\sigma_{\text{жт}} \cos \theta / r\rho g. \quad (11)$$

В данном случае ρ — плотность жидкости, в частности воды. Максимальное значение высоты подъема воды может достигать 15 м при радиусе пор, равном 1 мкм.

Граничные эффекты возникают во всех случаях соприкосновения жидкости с твердыми поверхностями, обладающими различной способностью смачиваться, но не во всех случаях они обретают существенное значение.

Адгезия жидкости определяет влагосодержание почвы и грунта, что непосредственно связано с урожайностью полей и строительством различных сооружений. Почва и грунт представляют собой частицы, между которыми имеется воздушное или поровое пространство. Когда частицы смачиваются водой и реализуется достаточно хорошая адгезия воды, в небольших по размерам порах (подобные поры имеют диаметр, равный единицам или десяткам микрометров, и их называют капиллярными) возникает сила F (см. рис. 8). Капиллярное поднятие за счет силы F , возникшее в результате адгезии и смачивания водой почвы, выполняет роль своеобразного насоса, который можно назвать адгезионным.

Адгезионный насос способен выкачивать влагу из почвы. Представим себе, что подобный насос действует безотказно. Тогда возможно самопроизвольное обезвоживание почвы, что оказало бы пагубное влияние на урожайность полей. К счастью, на пути этого насоса сама природа создает препятствие. Поровое пространство не является сплошным и имеет много тупиков, которые прерывают действие насоса. Верхний слой почвы покрывается своеобразной коркой, являющейся преградой для капиллярного поднятия глубинных вод.

Исключить вредное влияние почвенного адгезионного насоса можно искусственным путем. Для этой цели стремятся сохранить стерню, которая выполняет роль экрана, препятствующего капиллярному поднятию воды.

Безотвальная обработка почвы тоже своеобразное средство борьбы с отрицательными последствиями капиллярного поднятия воды. При подобной обработке разрушается ранее сложившаяся капиллярная система порового пространства и почвенный адгезионный насос перестает

существовать. Одновременно происходит задержание влаги в глубине почвы. При пахоте с отвалом грунта обнажаются нижние влагосодержащие слои, что облегчает испарение воды и обезвоживание почвы.

Капиллярное поднятие воды проявляется и при строительстве. Обычно строительные материалы, например кирпич, хорошо смачиваются водой. Кроме того, внутри самого материала, так же как в почве, имеется капиллярное поровое пространство. Все это создает благоприятные предпосылки для действия адгезионного насоса. Представьте себе, что в результате работы этого насоса вода поднимается из почвы по фундаменту и проникает в здание. Строительные материалы увлажняются и теряют свои качества, а в зданиях была бы повышенная влажность. Поэтому при сооружении фундамента обязательно ставят водонепроницаемые прокладки. Эти прокладки выполняют роль экрана и создают непреодолимое препятствие на пути движения воды.

Так, что же? Капиллярное поднятие воды приносит только вред? Нет, в некоторых случаях и громадную пользу. Весь растительный мир имеет корневую систему. Внутри каждого корня, подобно поровому пространству в почве, имеются тонкие капиллярные каналы. Влага почвы смачивает эти каналы, и благодаря адгезии возникает возможность движения воды из почвы к растению. Природа создает растительный адгезионный насос.

Каналы корневой системы переходят в каналы ствола дерева, стебля и листьев растений. Эти каналы пронизывают все растение. За счет капиллярного поднятия воды происходит питание растительного мира.

Если растительный адгезионный насос будет более мощным по сравнению с почвенным, то вода будет покорно следовать туда, где она нужнее, а нужна она для питания растений.

Таким образом, адгезия жидкости, которая проявляется в капиллярном поднятии воды, может быть в одном случае — при выкачивании влаги из почвы — отрицательным явлением, а в другом случае — при питании растений — необходимым и полезным. В этом суть диалектики явлений, в том числе и адгезии.

В мае 1981 г. состоялся полет научно-исследовательского комплекса «Салют-6» — «Союз Т-4» — «Союз-40», работал международный советско-румынский экипаж, проводился эксперимент «Капилляр». Цель эксперимента —

получить тонкие нити монокристалла. Для этой цели используют матрицу, в которой расположены искусственным путем созданные капилляры. Расплав химически однородного вещества в результате смачивания заполняет эти капилляры. В условиях космического полета земное притяжение отсутствует и имеет место лишь микрогравитация, т. е. $g \rightarrow 0$. В соответствии с формулой (11) это означает, что расплав может подняться в капилляре беспрепятственно на любую высоту. После затвердевания нить извлекают из матрицы. Невесомость в сочетании со смачиванием позволяет получить тонкие нити монокристаллов, что необходимо для их практического применения.

В июне 1982 г. советско-французский экипаж орбитального комплекса «Салют-7» — «Союз Т-5» — «Союз Т-6» на установке «Кристалл» осуществил технологический эксперимент «Ликвация». С учетом особенностей капиллярного смачивания проводилось формирование структуры сплава алюминия и индия. В земных условиях подобные сплавы получить невозможно. Цель этого эксперимента — получение новых композиционных материалов, которые состоят из элементов, резко отличающихся плотностью и температурой плавления.

«КАК С ГУСЯ ВОДА»

Приступаем к изложению одного из центральных вопросов — способов количественной оценки адгезии. Вспомним еще раз, что адгезия — это связь между двумя контактирующими телами, для нарушения которой необходимо внешнее воздействие. Именно по величине этого внешнего воздействия, измеряемого силой или работой, и дается количественная оценка адгезионного взаимодействия.

Покажем методы количественной оценки величины адгезии жидкости и на этой основе подтвердим справедливость пословицы «как с гуся вода».

Представим себе, что каким-либо образом удалось зацепить крючком прилипшие капли воды. Если теперь потянуть за этот крючок с силой, превышающей адгезионное взаимодействие, то произойдет удаление лишь части капли. Часть жидкости все же останется на поверхности. Как уже отмечалось, жидкость не обладает прочностью и не способна противодействовать внешней силе. В процессе

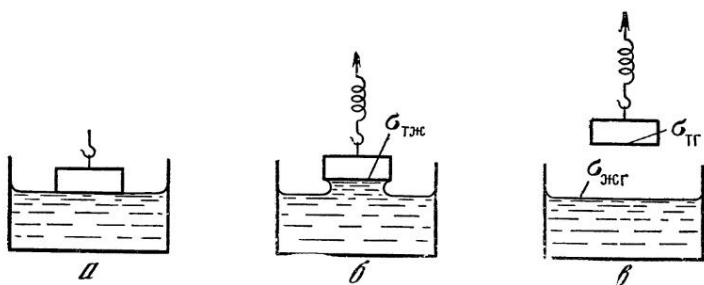


Рис. 9. Адгезия жидкости

a — начальное положение; *b* — процесс удаления твердого тела; *v* — после преодоления адгезии

отрыва капля жидкости под действием внешней силы происходит деформация каплей и удаление лишь части их, что не дает возможности определить истинное значение силы адгезии.

Оценка адгезии жидкости путем отрыва от ее поверхности твердого тела не дает точных результатов. В процессе отрыва часть жидкости (рис. 9, *b*) увлекается твердым телом и внешние усилия тратятся не только на преодоление адгезии, но и на подъем жидкости, образование перешейка и на другие побочные процессы.

Адгезия жидкости к твердой поверхности оценивается работой, которая затрачивается при нарушении связи жидкости с твердым телом. Заметим попутно, что подобный подход в дальнейшем будет использован для объяснения работы когезии жидкости; он может быть применен для оценки равновесной работы адгезии любых конденсированных тел.

В начальный момент, т. е. до нарушения контакта между жидкостью и твердым телом (рис. 9, *a*), взаимодействие определяется величиной удельной свободной поверхностной энергии на границе фаз твердое тело—жидкость $\sigma_{ТЖ}$.

В результате внешнего воздействия произойдет разъединение контактирующих тел (рис. 9, *v*) и образование новых границ раздела жидкость—газ и твердое тело—газ. Причем величина удельной свободной поверхностной энергии после нарушения адгезии изменится и станет равной $\sigma_{ТГ} + \sigma_{ЖГ}$.

Работа адгезии, затрачиваемая на удаление жидкости

от твердого тела, будет равна разности между удельными поверхностными энергиями тел на границе с газовой средой после нарушения контакта между ними ($\sigma_{тг} + \sigma_{жг}$) и удельной поверхностной энергией $\sigma_{тж}$, которая была до нарушения контакта, т. е.

$$W_{ад} = (\sigma_{тг} + \sigma_{жг}) - \sigma_{тж}, \quad (12)$$

где $\sigma_{тг}$, $\sigma_{жг}$ и $\sigma_{тж}$ — удельные свободные поверхностные энергии, или поверхностные натяжения на границе соответствующих фаз. Поверхностные натяжения твердого тела $\sigma_{тг}$ и $\sigma_{тж}$ трудно определить экспериментально. В противоположность этому поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой $\sigma_{жг}$ находится экспериментально даже в условиях заводских лабораторий. В большинстве случаев не представляет труда определение краевого угла θ .

Для упрощения формулы (12) разность ($\sigma_{тг} - \sigma_{тж}$) выражают при помощи краевого угла θ и поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$. Эта разность в соответствии с уравнением (8) будет равна $\sigma_{жг} \cos \theta$. Подставляя значение разности ($\sigma_{тг} - \sigma_{тж}$) в уравнение (12), можно получить формулу для определения равновесной работы жидкости:

$$W_{ад} = \sigma_{жг} (1 + \cos \theta). \quad (13)$$

Условия равновесия, в частности, означают, что работа, затрачиваемая на удаление жидкости от твердого тела, т. е. на нарушение адгезионного взаимодействия, будет численно равна работе, которая выделяется при формировании связи между контактирующими телами, т. е. при формировании адгезии.

Следует обратить внимание, что уравнение (13) получено на основе формальных термодинамических представлений. Фактически, как уже отмечалось, непосредственное измерение работы адгезии путем удаления жидкости от твердого тела трудно осуществить экспериментально. Между начальным положением контактирующих тел (рис. 9, а) и после преодоления адгезии (рис. 9, в) существует промежуточное положение (рис. 9, б), которое не учитывается формулами (12) и (13).

Уравнение (13) является основным уравнением, которое позволяет по известным значениям поверхностного натяжения жидкости $\sigma_{жг}$ и краевому углу θ определить равновесную работу адгезии жидкости. Величина этой работы измеряется в тех же единицах, что и удельная сво-

бодная поверхностная энергия, а именно в мДж/м² или эрг/см², и для воды обычно колеблется в пределах 50—145 мДж/м².

На практике, однако, встречаются случаи, когда измерить краевой угол θ и затем определить работу адгезии непросто, например в условиях испарения жидкости, для расплавов, при повышенной температуре, в условиях вакуума и повышенного давления. Для измерения краевого угла в этих условиях необходимы специальные установки и соблюдение ряда условий. Такие установки существуют и успешно применяются.

При помощи уравнения (13) можно определить численные значения равновесной работы адгезии жидкости и проследить ее изменение в зависимости от способности твердых тел смачиваться. В случае взаимодействия одной и той же жидкости с различными твердыми поверхностями по мере улучшения смачивания, т. е. с уменьшением краевого угла θ и ростом $\cos \theta$, равновесная работа адгезии увеличивается.

С увеличением краевого угла $\cos \theta$ уменьшается, а это в соответствии с уравнением (13) влечет за собой снижение работы адгезии жидкости. На гидрофобной поверхности краевой угол становится больше 90° , а косинус угла принимает отрицательное значение. Когда краевой угол будет равен 180° , то $\cos 180^\circ = -1$ и выражение в скобках уравнения (13), $(1 + \cos \theta)$, становится равным нулю. Это означает, что равновесная работа адгезии будет равна нулю, или, иными словами, ее нет. Как уже отмечалось ранее, таких предельно гидрофобных поверхностей не существует. Поэтому практически реализовать нулевую работу адгезии не представляется возможным. В отношении реальных предельно гидрофобных поверхностей равновесная работа адгезии будет минимальной. Незначительная адгезия и обуславливает скатывание капель воды. Выражение «как с гуся вода» можно рассматривать как своеобразную оценку минимальной адгезии жидкости.

Адгезии жидкости родственна когезия. Поэтому равновесную работу адгезии жидкости сопоставляют с работой когезии жидкости. Работа когезии равна той работе, которая необходима для преодоления взаимодействия между собой молекул жидкости. В результате внешнего воздействия образуются две новые поверхности раздела жидкость—газ. Поэтому работа когезии равна удвоенному значению удельной свободной поверхностной энергии

образующихся новых границ раздела фаз:

$$W_k = 2\sigma_{жг}. \quad (14)$$

Так же как и работу адгезии, определяемую по формуле (13), работу когезии относят к единице поверхности образующихся новых границ фаз.

При помощи уравнений (13) и (14) можно теперь уже количественно сопоставить родственные между собой явления — адгезию и когезию.

Сопоставление между адгезией и когезией жидкости теряет смысл на предельно гидрофильных поверхностях. Когда $\theta = 0$, а $\cos \theta = 1$, то в соответствии с уравнением (13) работа адгезии равна $2\sigma_{жг}$, т. е. работе когезии W_k [см. уравнение (14)]. Во всех случаях на предельно гидрофильных поверхностях работа когезии должна быть равна работе адгезии, что, правда, не всегда выполняется.

Итак, уравнение (13) дает возможность рассчитать равновесную работу адгезии жидкости, если известны краевой угол и поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой. Равновесная работа адгезии характеризуется тем, что свойства поверхностей до и после адгезии должны оставаться постоянными. Фактически это положение, как будет показано далее, часто не соблюдается. Тем не менее измерение краевого угла представляет нам довольно простой способ количественной оценки одного из видов адгезионного взаимодействия — адгезии жидкости.

УДИВИТЕЛЬНОЕ НЕПОСТОЯНСТВО

Количественная оценка адгезии частиц отличается от количественной оценки адгезии жидкости. Под действием внешней силы, которая на рис. 10 обозначена через $F_{отр}$, происходит отрыв прилипших частиц.

При отрыве частиц преодолевается сила адгезии. Поэтому количественно адгезия частиц измеряется силой, которая возникает при контакте частиц с поверхностью. Величина этой силы определяется свойствами контактирующих тел и окружающей эти тела среды — газовой или жидкой.

Силы адгезии только в некоторых, сравнительно редких случаях могут быть найдены расчетным путем. Чаще для определения силы адгезии прибегают к эксперименту. Для этой цели к прилипшим частицам прикладывают различным способом внешнюю силу. Величина этой силы

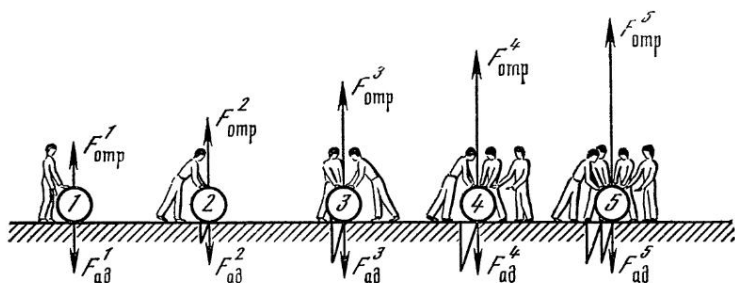


Рис. 10. Отрыв прилипших частиц, характеризующихся различной силой адгезии

равна, но противоположно направлена силе адгезии. Численное значение силы отрыва и определяет количественно адгезию частиц (рис. 10). Чем больше эта сила, тем значительнее адгезионное взаимодействие и тем труднее удалить прилипшие частицы.

Определение адгезии частиц при помощи силы имеет некоторые особенности. Дело в том, что сила адгезии даже одних и тех же частиц (однородных и одинакового размера) к одной и той же поверхности будет неодинаковой. Адгезия частиц характеризуется удивительным непостоянством. Для уяснения особенности проявления сил адгезии частиц обратимся к такому обыденному и знакомому процессу, как чистка одежды. При отряхивании пальто или костюма удаляется только часть пылевидных загрязнений. Более тщательная очистка достигается щеткой либо при помощи пылесоса, но лишь после химической чистки на фабрике одежда может приобрести первоначальную свежесть. Основной причиной различной степени очистки одежды является неоднозначность сил адгезии частиц загрязнений. Если бы адгезия частиц была одинакова, то очистку одежды от загрязнений можно осуществить каким-либо одним способом, например пылесосом.

Непостоянство сил адгезии проявляется при использовании такого косметического средства, как пудра. Адгезия частиц пудры к коже различна. В результате может происходить неравномерное их удаление. Слабо прилипшие частицы под действием внешних усилий (движение человека, поворот головы и т. д.) не в состоянии удержаться. Плохая адгезия этих частиц не может удовлетворить вкусы потребителей косметики: им необходи-

ма равномерная и достаточная адгезия частиц пудры. Для этого под слой пудры на кожу лица предварительно наносят крем или используют жидкую пудру.

Непостоянство сил адгезии частиц можно показать и на примере порошков инсектицидов. Частицы препарата после распыления осаждаются и по-разному закрепляются на листьях растений. В результате незначительной адгезии часть частиц удаляется за счет собственного веса. Другая часть может быть удалена только под действием ветра или дождя. Прочно прилипшие частицы, адгезия которых противодействует внешним условиям, остаются на листьях и выполняют свое назначение.

Непостоянство сил адгезии показано на рис. 10. Для всех пяти частиц, изображенных на этом рисунке, сила отрыва, а следовательно, и сила адгезии неодинаковы. При внешней силе отрыва, равной $F_{отр}^1$, будет удалена с поверхности только одна частица. Остальные четыре останутся на поверхности. Если число прилипших частиц принять за 100%, то удаление одной частицы будет составлять 20%. Долю частиц, удаляемую с поверхности под действием определенной силы отрыва, обозначим через α_F . При отрыве одной частицы из пяти $\alpha_F = 20\%$.

Если величина внешней силы отрыва будет составлять $F_{отр}^4$, то удалятся четыре частицы из пяти, а величина α_F становится равной 80% (см. рис. 10).

То, о чем мы говорили, представлено графически на рис. 11, а в виде зависимости доли удаляемых частиц α_F от силы адгезии; силу адгезии мы считаем численно равной силе отрыва.

С учетом масштаба сил на рис. 11 построены кривые зависимости $\alpha(F)$. Подобные кривые характеризуют распределение прилипших частиц по силам адгезии. На кривой 1 условно пронумерованы частицы, изображенные на рис. 10. Такие кривые называют интегральными адгезионными. Они имеют свою специфику. Сопоставим кривые 1 и 2, 1 и 3. Для определенного диапазона значений сил адгезии величина α_F изменяется неодинаково. Неоднозначность сил адгезии приводит к тому, что одна сила не может характеризовать адгезионное взаимодействие: помимо силы $F_{ад}$ необходимо указывать величину α_F , т. е. долю частиц, которая будет удалена с поверхности в результате воздействия этой силы. Например, если при силе $5 \cdot 10^{-8}$ Н удаляется 80% прилипших частиц, то лишь 20% остается на поверхности.

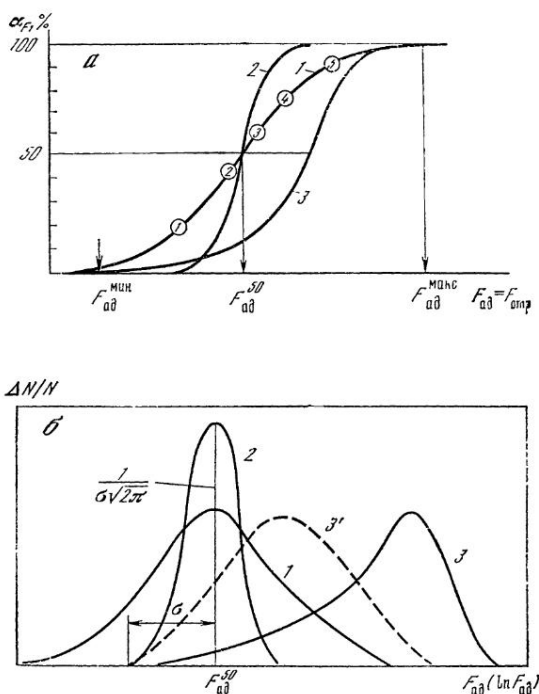


Рис. 11. Интегральные (а) и дифференциальные (б) адгезионные кривые 1 — исходная; 2 — при изменении диапазона сил адгезии (среднее квадратическое отклонение); 3 — при изменении медианной силы адгезии

Оценка адгезии при помощи двух величин, $F_{ад}$ и $\bar{\alpha}_F$, неудобна для практических целей. Никто ведь не выражает размеры предметов одновременно при помощи двух различных единиц измерений — за основу принят метр, а также кратные или дольные ему единицы.

Для более точной оценки адгезии частиц необходимо рассмотреть особенности распределения прилипших частиц по силам адгезии. Силы адгезии частиц предстают как математически случайные величины и характеризуются определенным диапазоном значений. Так, сила адгезии стеклянных шарообразных частиц диаметром 50 мкм к стеклянной поверхности изменяется от $9 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-6}$ Н, т. е. почти на три порядка.

Помимо интегральных воспользуемся дифференциальными кривыми распределения прилипших частиц по силам адгезии или дифференциальными адгезионными кривыми (рис. 11, б). Дифференциальные кривые показывают долю частиц ($\Delta N/N$), приходящуюся на определенный диапазон значений сил адгезии.

Теоретически силы адгезии частиц могут подчиняться нормальному закону распределения случайной величины; дифференциальные кривые в этом случае симметричны (см. рис. 11, б, кривые 1 и 2). В большинстве реальных случаев распределение прилипших частиц по силам адгезии не подчиняется нормальному закону и оказывается асимметричным (кривая 3). Чтобы использовать математический аппарат и таблицы, разработанные для нормального распределения, реальные асимметричные распределения приводят к нормальному, откладывая на оси абсцисс логарифм значений аргумента, в данном случае силы адгезии. Тогда получают достаточно симметричную дифференциальную кривую (см. рис. 11, б, кривая 3'), которая отвечает нормально-логарифмическому распределению.

Распределение прилипших частиц по силам адгезии, как и всякую случайную величину, можно характеризовать при помощи некоторых параметров, к числу которых относится так называемое стандартное отклонение σ ; его иногда называют средним квадратичным. Среднее квадратичное отклонение характеризует разброс значений сил адгезии и высоту холма дифференциальной адгезионной кривой (на рис. 11, б значение σ показано по отношению к кривой 2). Распределения сил адгезии, которые отражаются кривыми 1 и 2, отличаются средним квадратичным. Чем выше холм дифференциальной кривой, тем больше среднее квадратичное отклонение. В случае адгезии сферических стеклянных частиц к стеклянной поверхности среднее квадратичное отклонение снижается с 2,88 до 1,0 при увеличении диаметра частиц с 20 до 100 мкм, т. е. с увеличением размера частиц разброс значений сил адгезии снижается.

Для симметричного распределения случайной величины, описываемого нормальным законом, имеет смысл оценивать медиану, т. е. величину, справа и слева от которой имеется одинаковое число рассматриваемых событий. В данном случае это $F_{ад}^{50}$, ее называют «медианная сила адгезии», и она соответствует величине $\alpha = 50\%$.

Подчеркнем, использование медианной силы имеет смысл только при симметричном распределении.

Оценка адгезии частиц при помощи медианной силы без учета среднего квадратичного отклонения может привести к неточностям. Достаточно сопоставить между собой кривые 1 и 2 на рис. 11, а. Одному и тому же медианному значению силы адгезии будет соответствовать различный диапазон сил адгезии.

Таким образом, медианная сила адгезии характеризует положение дифференциальной адгезионной кривой, а среднее квадратичное отклонение — ее форму. Отдельно каждая из этих величин не дает полной количественной характеристики сил адгезии.

С учетом распределения сил адгезии как случайной величины адгезия частиц определяется математическим ожиданием, которое называют средним значением случайной величины. Применительно к адгезии частиц такой величиной будет *средняя сила адгезии*, которая является средневзвешенной величиной и равна:

$$F_{\text{ад}}^{\text{ср}} = \int_{F_{\text{ад}}^{\text{мин}}}^{F_{\text{ад}}^{\text{макс}}} x f(x) d(x), \quad x = F_{\text{ад}}. \quad (15)$$

Функция $f(F_{\text{ад}})$ определяется на основе адгезионных кривых. Для расчета средней силы адгезии уравнение (15) приводят к табличному интегралу вероятности, а значения $F_{\text{ад}}^{\text{мин}}$, $F_{\text{ад}}^{\text{макс}}$, σ и $F_{\text{ад}}^{50}$ получают опытным путем, выражая экспериментальные данные при помощи интегральных и дифференциальных адгезионных кривых.

Важно подчеркнуть следующее. Средняя сила, во-первых, является обобщенным количественным показателем адгезии частиц; во-вторых, в ней учтено распределение прилипших частиц по силам адгезии. Поэтому средняя сила адгезии является наиболее выразительной количественной характеристикой адгезионного взаимодействия частиц.

Методы определения адгезии частиц основаны на отрыве частиц под действием внешней силы (см. рис. 10). В зависимости от условий приложения внешней силы эти методы можно разделить на две группы.

К первой группе относятся методы, основанные на отрыве относительно большого числа частиц. Особенностью этих методов является то, что сила отрыва действует

одновременно на все прилипшие частицы, находящиеся на данной поверхности. К числу этих методов относится отрыв прилипших частиц при наклоне запыленной поверхности, а также в результате действия центробежных, вибрационных или импульсных сил. В методах, относящихся ко второй группе, силы отрыва действуют на отдельные частицы и не распространяются на все прилипшие частицы.

Чаще применяется первая группа методов. Они более доступны в отношении аппаратуры и дают данные, достаточные для статистической обработки. Методы, основанные на отрыве отдельных частиц, более точны, позволяют производить измерение адгезии в различных условиях (вакуум, повышенная температура и т. д.), но трудоемки и требуют специальной аппаратуры.

До сих пор речь шла об оценке адгезии отдельных частиц, т. е. того случая, когда прилипшие частицы не соприкасаются друг с другом. Этот случай изображен на рис. 3, а.

Оценка адгезии монослоя и полислоя частиц, схематически представленных на рис. 3, б и в, отличается от оценки адгезии индивидуальных частиц. Сила адгезии полислоя частиц $F_{ад}^N$ определяется в расчете на число частиц N , приходящихся на единицу площади контакта. Связь между силой адгезии слоя частиц и силой адгезии $F_{ад}$ отдельных частиц определяется следующим соотношением:

$$F_{ад}^N = F_{ад}N. \quad (16)$$

Сила адгезии слоя частиц имеет размерность Н/м² (ньютон на квадратный метр) или дин/см².

В прилипшем слое частицы связаны между собой силами аутогезии. В результате этого слой представляет собой как бы одно целое.

При удалении слоя с наклонных или вертикально расположенных поверхностей прилипшие частицы действуют по принципу «один за всех, все за одного». Под действием внешней силы сначала нарушается адгезия только отдельных частиц, сила взаимодействия которых незначительна и равна $F_{ад}^{мин}$ (см. рис. 11, а). После отрыва сравнительно небольшой части прилипшего слоя эта часть увлекает за собой остальную массу частиц. Минимальная сила адгезии согласно уравнению (16) в данном случае определяет условие удаления слоя частиц.

В заключение отметим особенности количественной

оценки адгезии частиц по сравнению с оценкой адгезии жидкости. Адгезия частиц измеряется силой. Величина этой силы хотя и поддается определению, но удивительно непостоянна. Для исключения этого непостоянства прибегают к выражению величины адгезии частиц при помощи средней силы.

Адгезия жидкости определяется работой. Характерными особенностями выражения адгезии жидкости через работу являются равновесная величина работы и невозможность непосредственного измерения этой работы. Опытным путем определяют лишь те параметры, от которых зависит численное значение работы адгезии жидкости.

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ

Адгезию пленок, как и адгезию частиц, определяют методом отрыва. Под действием внешней силы $F_{\text{отр}}$, превышающей величину адгезионного взаимодействия, нарушается граница раздела адгезив—субстрат. При отрыве происходит перемещение границы раздела фаз вдоль поверхности субстрата (рис. 12). Такое перемещение означает, что помимо силы отрыва $F_{\text{отр}}$ решающее значение приобретает произведение этой силы на расстояние H , т. е. работа отрыва пленки $W_{\text{отр}}$. Именно работа отрыва является важнейшим количественным показателем адгезии пленок.

Обратите внимание на то, что все время говорится о работе и силе отрыва, а не о работе и силе адгезии пленок. Это не случайно. Сила или работа отрыва не равны силе или работе адгезии. При отрыве пленок на преодоление адгезии тратится только часть внешнего усилия. Эта часть работы или силы отрыва, идущая на преодоление адгезии пленок, обозначается соответственно через $W_{\text{ад}}$ и $F_{\text{ад}}$.

Остальная часть внешнего усилия расходуется на побочные процессы. К числу этих процессов относится деформация пленки в связи с изменением ее формы при отрыве. Если сопоставить между собой пленку в условиях адгезии (рис. 12, *а*) и в процессе ее отрыва (*б*), то видно, что под действием внешней силы происходит изгиб пленки. Пленка отрывается от поверхности не сразу, а на отдельных участках. Часть пленки, потерявшая связь с поверхностью, изменяет свою форму и деформируется. На дефор-

мацию пленки затрачивается определенная доля внешней работы отрыва — W_d .

Адгезия может быть вызвана электрической силой, возникающей в зоне контакта твердых поверхностей. В этих условиях пленка и основа представляют собой своеобразный электрический конденсатор и отрыв пленок равноценен разведению разноименно заряженных пластин. При определенной

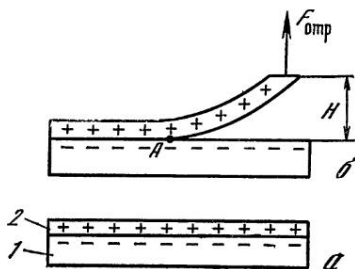


Рис. 12. Схема адгезионного отрыва пленки методом отслаивания

1 — субстрат; 2 — адгезив

скорости отрыва может происходить разряд поверхности конденсатора. Часть работы отрыва тратится на преодоление электрического взаимодействия и разряд. Эта часть работы равна W_3 .

Некоторая доля внешнего воздействия затрачивается на преодоление сопротивления неровностей поверхности, на нагрев пленки и другие потери — $W_{\text{п}}$.

В материале пленки могут возникнуть внутренние напряжения, которые снижают адгезию. Внутренние напряжения облегчают отрыв пленки, снижая внешнее усилие на величину $W_{\text{вн}}$.

В общем виде работа отрыва пленки равна:

$$W_{\text{отр}} = W_{\text{ад}} + W_d + W_3 + W_{\text{п}} - W_{\text{вн}}. \quad (17)$$

Если же оценка адгезии проводится по силе отрыва в расчете на единицу площади контакта, то по аналогии с условием (17) можно написать:

$$F_{\text{отр}} = F_{\text{ад}} + F_d + F_3 + F_{\text{п}} - F_{\text{вн}}. \quad (18)$$

Из соотношений (17) и (18) видно, что работа и сила отрыва, как правило, больше работы и силы адгезии, т. е. $W_{\text{отр}} > W_{\text{ад}}$ и $F_{\text{отр}} > F_{\text{ад}}$. Только в крайне редких случаях, когда величина $(W_d + W_3 + W_{\text{п}} - W_{\text{вн}})$ равна нулю, работа отрыва тождественна работе адгезии.

Работу отрыва $W_{\text{отр}}$ характеризуют как адгезионную прочность прилипших пленок. Введение понятия «адгезионная прочность» позволяет еще раз подчеркнуть раз-

личие между работой адгезии $W_{ад}$ и тем внешним воздействием, которое необходимо для отрыва пленок ($W_{отр}$).

На практике применяют различные методы определения адгезионной прочности путем отрыва пленок. На рис. 12 приведена схема метода отслаивания, когда осуществляется последовательный отрыв пленки от основы. Возможен одновременный отрыв всей пленки силой, действующей нормально или тангенциально к площади контакта.

При оценке адгезии пленок возникают определенные трудности. Численные значения адгезионной прочности определяются особенностями метода отрыва и геометрическими размерами прилипшей пленки. Вследствие этого адгезионная прочность пленки к одной и той же поверхности будет зависеть от толщины и ширины пленки, скорости ее отрыва, направления силы отрыва по отношению к поверхности субстрата и ряда других факторов.

Для сравнения полученных результатов проводят определение адгезионной прочности в одинаковых условиях на образцах одного и того же размера. Некоторые методы и условия определения адгезионной прочности регламентируются стандартами.

В отличие от других видов адгезии при определении адгезии пленок путем их отрыва измеряется не адгезия, а адгезионная прочность, которая зависит от условий отрыва пленок. Собственно адгезия пленок составляет в большинстве случаев лишь часть адгезионной прочности.

Сведения об адгезии можно дополнить следующими словами:

количественная оценка: адгезия жидкости измеряется работой, адгезия частиц — силой, а пленок — адгезионной прочностью.

ПРИЧИНЫ АДГЕЗИИ

ПРИТЯЖЕНИЕ РАЗНОИМЕННЫХ

Что же заставляет тела взаимодействовать между собой, или, иными словами, в чем причина адгезии? Этих причин несколько. Есть причины, которые свойственны всем видам адгезии. К их числу относится межмолекулярное взаимодействие.

Существуют силы внутри молекул. Именно эти силы, связывающие между собой атомы, являются причиной создания молекул многих миллионов естественных и искусственных веществ. Но и сами молекулы могут взаимодействовать между собой. Подобное взаимодействие называется межмолекулярным.

Для уяснения сути межмолекулярного взаимодействия (межмолекулярной связи, или межмолекулярных сил) вспомним простой школьный опыт с двумя шариками, которые получили одноименный заряд. Одноименно заряженные шарики отталкиваются. В другом опыте шарики заряжены разноименно. Наличие разноименных зарядов приводит к притяжению двух шариков. В основе межмолекулярного взаимодействия лежит притяжение разноименных зарядов.

Одним из первых межмолекулярное взаимодействие рассмотрел голландский ученый Ван-дер-Ваальс применительно к газам. Впоследствии это представление было распространено на конденсированные тела — жидкости и твердые вещества. Часто межмолекулярное взаимодействие по имени первооткрывателя называют ван-дер-ваальсовым.

Межмолекулярное взаимодействие по своей природе неодинаково. Оно неразрывно связано со структурой молекул. Молекулы состоят из атомов. Вокруг положительно заряженного ядра расположено электронное облако, в котором сосредоточены отрицательные заряды. При образовании молекул из атомов центры противоположных зарядов, обусловленных ядрами атомов и электронным облаком, могут совпадать или не совпадать (рис. 13).

Именно те молекулы, у которых наблюдается смещение зарядов, и будут полярными.

Полярность молекул характеризуется дипольным моментом. Дипольный момент μ полярных молекул определяется произведением заряда e на расстояние между центрами этих зарядов h , т. е.

$$\mu = eh. \quad (19)$$

Чем значительнее полярность молекул, тем больше их дипольный момент. У неполярных молекул (рис. 13, в)

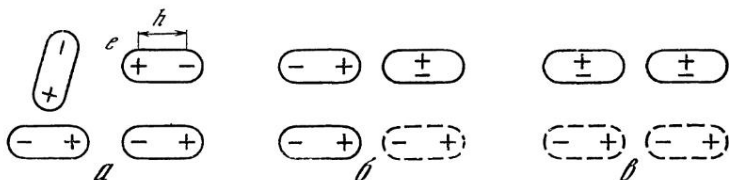


Рис. 13. Различные виды межмолекулярного взаимодействия

а — ориентационное; б — индукционное; в — дисперсионное. В верхней части рисунка — исходное положение; в нижней — в период взаимодействия

хотя и имеется определенный заряд, но центры этих зарядов совмещены и $h = 0$. Поэтому дипольный момент подобных молекул равен нулю.

Межмолекулярное взаимодействие может быть ориентационным, индукционным и дисперсионным.

Ориентационное взаимодействие, схема которого приведена на рис. 13, а, характерно для полярных молекул. В верхней части этого рисунка показано положение молекул до их взаимного влияния — молекулы друг относительно друга принимают случайное положение. При сближении молекул они ориентируются в определенном положении. Ориентация обуславливается электростатическим взаимодействием разноименных зарядов соседних молекул. Величина этого взаимодействия и определяет прочность межмолекулярных связей.

Характерными признаками ориентационного взаимодействия является наличие полярных молекул, ориентация их относительно разноименно заряженных частей соседних молекул (от процесса ориентации происходит название этого вида межмолекулярного взаимодействия) и определенная величина дипольного момента полярных молекул.

Межмолекулярное взаимодействие может осуществляться между полярными и неполярными молекулами. Такое взаимодействие называют индукционным. Уяснить смысл индукционного взаимодействия позволит схема, приведенная на рис. 13, б. Полярная молекула при соприкосновении с неполярной вызывает смещение зарядов в этой молекуле, или, как говорят, индуцирует дипольный момент у соседней молекулы. В результате неполярная молекула становится полярной. В дальнейшем межмолекулярное взаимодействие осуществляется так же, как и в случае взаимодействия двух полярных молекул, когда притягиваются разноименные заряды.

Третий вид межмолекулярного взаимодействия — дисперсионное. Существование дисперсионного взаимодействия и его количественные выражения получены на основании квантовомеханических представлений. Суть этих представлений вкратце можно свести к следующему. Движение электронов атомов, составляющих молекулу, происходит самосогласованно. На достаточно близком расстоянии наблюдается и межмолекулярное согласование движения электронов, т. е. согласованное смещение зарядов, приводящее к возникновению мгновенных диполей. Возможность образования последних обусловлена тем, что в быстром вращении электроны движутся с частотой, гораздо большей собственных колебаний атомов в молекуле. Количественно теория подобного взаимодействия связана с дисперсией света. По этой причине оно и называется дисперсионным.

В некоторый ограниченный период времени у неполярных молекул может возникнуть мгновенный дипольный момент. Взаимодействие подобных молекул в этот период (рис. 13, в) и будет дисперсионным. Необходимой предпосылкой дисперсионного взаимодействия является нахождение, даже в относительно небольшой период времени, молекул в поляризованном состоянии.

Межмолекулярное взаимодействие неполярных молекул реализуется лишь в виде дисперсионного. В отношении полярных молекул различные виды межмолекулярного взаимодействия могут проявляться в совокупности.

Для характеристики приведем значения энергии межмолекулярного взаимодействия для некоторых неполярных и полярных молекул с учетом того, что водородные связи включены в состав дисперсионного взаимодействия (все величины даны в условных единицах):

Неполярные молекулы	H ₂	N ₂	CH ₄
Энергия дисперсионного взаимодействия	11	62	117
Полярные молекулы	HCl	NH ₃	H ₂ O
Энергия следующих видов взаимодействий:			
ориентационного	19	84	190
индукционного	6	10	10
дисперсионного	105	93	47

Из приведенных данных следует, что для полярных молекул ориентационное взаимодействие не всегда является преобладающим.

Первоначально теория межмолекулярной связи была разработана применительно к взаимодействию между собой отдельных молекул, в частности газов. В дальнейшем эти представления были распространены на межмолекулярное взаимодействие конденсированных тел и на различные виды адгезии. Заметим еще раз, что под термином «конденсированные тела» следует понимать твердое или жидкое состояние этих тел.

Для уяснения особенностей межмолекулярного взаимодействия конденсированных тел по сравнению с взаимодействием пары молекул обратимся к рис. 14, а. Представим, что молекула А, принадлежащая одному из конденсированных тел, взаимодействует с другим телом. Это взаимодействие осуществляется на расстоянии R между молекулой А и молекулами другого тела, когда сами тела расположены друг относительно друга на расстоянии H . Одна молекула тела 1 взаимодействует со многими молекулами соседнего тела 2. Но таких молекул в самом теле очень много. Аналогично можно рассматривать взаимодействие одной молекулы тела 2 по отношению к молекулам тела 1. Говоря иными словами, для определения межмолекулярного взаимодействия при адгезии двух тел необходимо суммировать все парные взаимодействия молекул двух конденсированных тел. Такое суммирование проведено применительно к взаимодействию тел различной формы.

Окончательно силы межмолекулярного взаимодействия в случае адгезии тел различной формы можно определить при помощи следующих аналитических выражений:

для двух сферических частиц (рис. 14, б)

$$F = Ar/12H^2, \quad (20)$$

для сферической частицы и плоскости (рис. 14, в)

$$F = Ar/6H^2, \quad (21)$$

для двух плоскостей (рис. 14, а)

$$F = A/6\pi H^3. \quad (22)$$

В формулах (20) и (21) сила F характеризует межмолекулярное взаимодействие в расчете на одну адгезирующую частицу, при помощи формулы (22) это взаимодействие

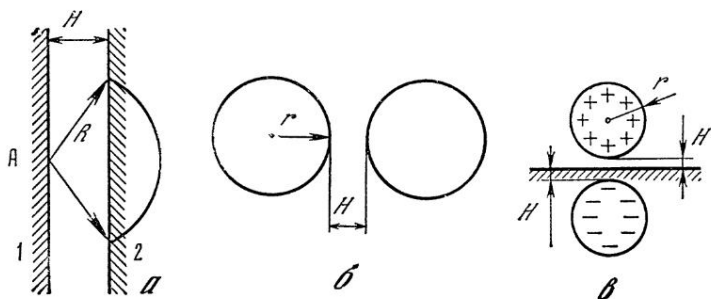


Рис. 14. Взаимодействие конденсированных тел различной формы

а — двух поверхностей; б — двух частиц; в — частиц и поверхности с учетом заряда частицы. r — радиус частиц; H — расстояние между телами; R — радиус действия межмолекулярных сил

определяется в расчете на единицу площади контакта. В соответствии с рис. 14 радиус частиц равен r , расстояние H показывает зазор между поверхностями.

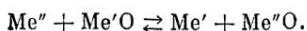
Величина A , входящая в формулы (20)—(22), является постоянной и зависит от свойств соприкасающихся поверхностей и среды, окружающей эти поверхности. Эту величину называют константой межмолекулярного взаимодействия.

Константа учитывает особенности межмолекулярного взаимодействия. К числу этих особенностей относится природа взаимодействия, т. е. совокупное или частное проявление ориентационного, индукционного и дисперсионного взаимодействий. Кроме того, учитывается число взаимодействующих пар молекул. По существу константа A является своеобразным мостиком, связывающим взаимодействие пары молекул с общим числом реагирующих молекул двух тел. При изменении расстояния между двумя телами изменяется межмолекулярное взаимодействие, а значение константы A остается постоянным.

Адгезия за счет межмолекулярного взаимодействия обратима. При отрыве частиц необходимо приложить силу, равную по величине, но направленную противоположно межмолекулярному взаимодействию. После отрыва частиц свойства самих частиц остаются такими, какими они были до адгезии.

Обратимость процесса адгезии проявляется не всегда. В зоне контакта возможна химическая реакция между контактирующими телами. Химическая связь, во-первых, изменяет свойства поверхностей, во-вторых, самым непосредственным образом влияет на адгезию. Процесс адгезии перестает быть обратимым.

Химическая реакция наблюдается, например, при смазывании графита расплавами таких металлов, как германий и олово. При контакте жидкого металла (Me'') с окисленной поверхностью ($Me'O$), химическую реакцию в общем виде можно представить следующим образом:



Адгезия расплавов металлов существенно выше по сравнению с адгезией жидкостей, в частности воды. Как уже отмечалось, для обычных жидкостей поверхностное натяжение $\sigma_{жг}$ не превышает 100 мДж/м^2 , для расплавов оно значительно больше и может превышать 1000 мДж/м^2 . В соответствии с уравнением (13) увеличение $\sigma_{жг}$ приводит к значительному росту равновесной работы адгезии. Кроме того, за счет химического взаимодействия возникает неравновесная работа адгезии, величина которой для расплавов металлов может превышать равновесную работу адгезии.

Так, адгезия композиционных материалов на основе стекла к вольфраму и его сплавам усиливается за счет химического взаимодействия при добавлении окислов кобальта и никеля. Подобные материалы применяют при формировании вакуумно-плотных соединений электронных приборов.

Возникновение химической связи часто сопровождает процесс формирования прилипших пленок. Такая ситуация возникает при образовании покрытий из полиэтилена. Обычно полиэтилен обладает недостаточной адгезией к стальной поверхности. При нагревании в процессе термоокисления в результате добавления высокодисперсных неорганических частиц возникают полярные функциональные группы. Эти группы взаимодействуют с поверхно-

стью стали, образуя химическую связь и усиливая тем самым адгезию за счет неравновесной ее части.

Адгезия некоторых полимерных материалов, таких, как, например, фенолформальдегидных смол к металлам, усиливается за счет соле- и комплексообразования. Особой химической активностью обладают клеевые композиции. При склеивании резиновых изделий, а также при ремонте автомобильных камер и шин происходит термическая вулканизация. Химическое взаимодействие возникает за счет веществ, содержащихся в клее и накладываемой заплате.

При использовании цианакрилатных, карбинольных, эпоксидных, изоцианатных клеев за счет химической активности гидроксильных ($-\text{OH}$), аминных ($-\text{NH}_2$), сульфгидрильных ($-\text{SH}$) и других групп образуется химическая связь и достаточная адгезия даже к металлу, имеющему поверхностную окисную пленку.

Адгезия за счет химической связи может усилиться настолько, что будет превосходить когезию. Если, например, силикатный клей («жидкое стекло») нанести на стеклянную поверхность, то образующаяся прилипшая пленка в последующем удаляется очень трудно. В процессе удаления поверхность стекла будет безнадежно испорчена, и для ее восстановления необходима шлифовка.

Особо прочные химические связи образуют кремнийорганические соединения, например хлоралкилсиланы (типа $(\text{CH}_3)_n\text{SiCl}_m$, $n, m = 1 \div 3$). Эти соединения взаимодействуют с гидроксильными группами, образуя при этом тонкие пленки, которые сообщают поверхности гидрофобные свойства.

В заключение следует подчеркнуть, что основной причиной возникновения адгезии является межмолекулярное взаимодействие. Оно проявляется во всех ее видах: при адгезии жидкости, пленок и частиц. В ряде случаев адгезия усиливается за счет химической связи.

ЗЕРКАЛЬНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ

Все то, что видно в зеркале, это не собственно предметы, а их зеркальное отображение.

С одним проявлением зеркального отображения приходится встречаться при адгезии частиц. Обычно частицы, находящиеся в воздухе, несут определенные электрические заряды. При контакте заряженных частиц с поверх-

ностью на ней индуцируются равные по величине, но противоположные по знаку заряды (см. рис. 14, *е*). Эти заряды и будут зеркальным отображением исходного заряда частиц. Между противоположными зарядами возникает кулоновская сила взаимодействия, которую мы можем назвать силой зеркального отображения.

Если первоначальный заряд частиц, имеющих радиус r , равен Q , то силу зеркального отображения можно определить по следующей приближенной формуле:

$$F_3 = Q^2/(2r)^2. \quad (23)$$

В формуле (23) не учитывается зазор H между частицей и поверхностью, а также возможное смещение центра заряда по отношению к центру частицы. Поэтому ее можно применять для предварительных оценочных расчетов.

Фактически сила зеркального отображения не всегда оказывает влияние на адгезию частиц. Заряд взвешенных в воздухе частиц может колебаться в широких пределах. В обычных условиях максимальное значение его не превышает 10^3 элементарных зарядов (элементарным называется заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Если подсчитать по формуле (23) силу зеркального отображения для подобных зарядов, то она будет составлять 10^{-12} Н, или 10^{-7} дин. Для сравнения отметим, что усилие лапок комара составляет 10^{-6} Н.

В обычных условиях сила зеркального отображения не оказывает заметного влияния на величину адгезии и ею можно пренебречь. На практике, однако, можно усилить адгезию путем искусственной зарядки частиц. Увеличение заряда частиц приводит к росту силы зеркального отображения.

Усиление адгезии за счет силы зеркального отображения применяют в процессе очистки воздуха электрофильтрами. Если в обычном состоянии заряд частиц не превышает 10^3 элементарных зарядов, то в электрофильтре заряд частиц увеличивается до 10^7 элементарных зарядов, или $1,6 \cdot 10^{-12}$ Кл. Увеличение зарядов на четыре порядка в соответствии с формулой (23) означает рост силы зеркального отображения на восемь порядков, т. е. в 10^8 раз по сравнению с подобными силами в обычных условиях. При очистке воздуха и газов от примесей в электрофильтрах сила зеркального отображения проявляется в полной мере и становится основной причиной адгезии. По мере работы электрофильтра частицы из запыленного

потока закрепляются на осадительном электроде и образуют прилипший слой.

Зеркальное отображение проявляется и в других случаях. Широко распространена технология окраски изделий, когда лакокрасочные материалы распыляют воздухом и дробят на мельчайшие капли, одновременно придавая им электрический заряд. Заряженные частицы двигаются к изделию по определенным силовым линиям, что приводит к экономии лакокрасочного материала. Резкое усиление адгезии за счет силы зеркального отображения создает предпосылки прочной связи формирующегося лакокрасочного покрытия с основой, а это значительно улучшает качество окрашенных изделий.

Электрическое поле используют при уже обсуждавшемся распылении порошков инсектицидов. Заряженные частицы и капли препарата осаждаются на листьях растений и под действием силы зеркального отображения прочно закрепляются на них. Это обстоятельство позволяет более эффективно использовать препарат по прямому назначению.

Сила зеркального отображения изменяется с течением времени. Прилипшие к поверхности заряженные частицы разряжаются, и их заряд уменьшается. Уменьшение заряда частиц, в свою очередь, ведет к снижению силы зеркального отображения.

Сила зеркального отображения может сказываться во всех видах адгезии — частиц, жидкости и пленок.

Как уже отмечалось, в электрическом поле можно зарядить не только частицы, но и капли жидкости. Электрическое поле одновременно способствует дроблению капель. В отличие от частиц после образования слоя из прилипших капель и непосредственного контакта капель между собой происходит их слияние. В результате слияния образуется слой жидкости (см. рис. 1, б), заряд которого противоположен заряду поверхности. Сила зеркального отображения продолжает оказывать влияние на адгезию и в этом случае.

После затвердевания слоя жидкости образуется прилипшая пленка, которая также может быть носителем избыточных зарядов. Между пленкой и основой возникает сила зеркального отображения, определенное время оказывающая влияние на адгезию.

Итак, сила зеркального отображения, или кулоновская сила, является одной из причин адгезии. В отличие

от межмолекулярного взаимодействия сила зеркального отображения оказывает влияние на адгезию не во всех случаях. Для реализации этой компоненты адгезионного взаимодействия необходимы определенные условия, к числу которых относится предварительный заряд частиц или капель.

ПО АНАЛОГИИ С КОНДЕНСАТОРОМ

Сила зеркального отображения является разновидностью сил электрической природы. В формировании адгезии помимо силы зеркального отображения участвует также электрическая сила, возникающая при контакте двух тел. Для краткости в дальнейшем подобную силу будем называть просто электрической.

Электрическая сила проявляется при различных видах адгезии частиц, жидкости и пленок. Наибольшее значение, однако, она приобретает в случае стабильного контакта между двумя поверхностями на сравнительно значительной площади, что имеет место при адгезии пленок. На этом примере мы и рассмотрим проявление электрической силы.

Представим, что до адгезии, т. е. до непосредственного контакта двух тел, заряд на соприкасающихся телах отсутствовал. При адгезии (см. рис. 12, *a*) в зоне контакта пленки с поверхностью образуется двойной электрический слой. В целом система, в данном случае адгезив и субстрат, представляет собой своеобразный конденсатор, одна обкладка которого принадлежит адгезиву (пленке), а другая — субстрату (основанию).

Причина возникновения двойного электрического слоя заключается в энергетической неоднородности контактирующих поверхностей. При контакте происходит выравнивание энергетических уровней, что обусловлено донорно-акцепторным процессом.

Донором называют того, кто что-то отдает. Донор — человек, добровольно отдающий свою кровь для переливания больным. В адгезии донором называют тело, которое способно отдавать электроны другому телу. Отдача электронов происходит не добровольно, а вызвана энергетической неоднородностью контактирующих поверхностей.

Отдавая электроны, поверхность обогащается положительными зарядами. На рис. 12, *б* в качестве донора изо-

бражен адгезив. Вторая поверхность выполняет функции акцептора — она принимает электроны, приобретая тем самым отрицательный заряд. Акцептором становится субстрат.

Нетрудно определить различие между силой зеркального отображения и электрической силой, образующейся в результате адгезии. Необходимое условие проявления силы зеркального отображения — наличие предварительного заряда, который должен быть на частице до ее контакта с поверхностью. При контакте подобный заряд вызывает силу зеркального отображения (рис. 14, *в*).

Электрическая сила возникает только в результате контакта; в отсутствие контакта двух тел она не существует. Электрическая сила — это результат взаимодействия обкладок своеобразного конденсатора, который образуется в зоне контакта. Причем в случае адгезии заряды не появляются и система, как уже отмечалось, нейтральна (рис. 12, *а*). Электрическая сила дает о себе знать только в процессе преодоления адгезии, при отрыве пленки от поверхности (рис. 12, *б*).

При формировании адгезии за счет электрической силы и ее нарушении прослеживается диалектическая связь между причиной и следствием. Непосредственной причиной возникновения электрической силы служит контакт двух поверхностей, т. е. их адгезия. Следствием является усиление адгезии и необходимость затраты дополнительного усилия для нарушения адгезионного взаимодействия.

Структура двойного слоя нарушается при отрыве пленок, когда определяется не истинная адгезия, а адгезионная прочность. Электрическая сила оказывает влияние на величину адгезионной прочности. Причем это влияние зависит не только от плотности заряда двойного слоя, но и от условий его нарушения.

Плотность заряда и его знак можно изменить модификацией поверхности, которая осуществляется химическими реагентами и другими способами.

Электрическая сила проявляется также в случае адгезии частиц. Возникновение двойного электрического слоя при контакте частиц показано на рис. 15. Площадь контакта с поверхностью по сравнению с площадью контакта пленок менее значительна. Это и обуславливает меньшее влияние электрических сил на адгезию частиц по сравнению с их влиянием на адгезию пленок.

Наличие двойного слоя в случае адгезии частиц было доказано экспериментально. Проводилось измерение зарядов частиц до их адгезии и после отрыва частиц от поверхности. Оказалось, что величина и знак заряда до и после адгезии изменяются. Эти изменения вызваны образованием двойного электрического слоя в зоне контакта. Даже в

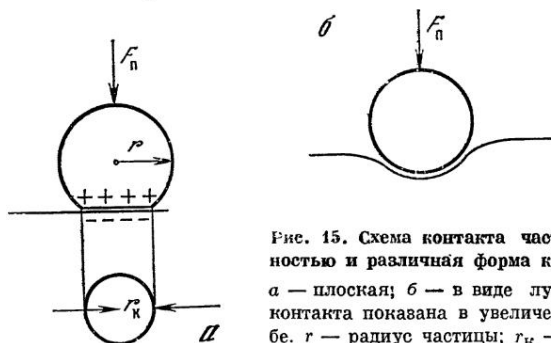


Рис. 15. Схема контакта частиц с поверхностью и различная форма контакта
 а — плоская; б — в виде лунки; площадь контакта показана в увеличенном масштабе. r — радиус частицы; r_k — радиус площади контакта

тех случаях, когда частицы до адгезии были нейтральны, после адгезии они приобретали определенный заряд.

Итак, электрическая сила может возникнуть в результате контакта и обнаруживается в процессе нарушения адгезионного взаимодействия. Она проявляется в случае адгезии пленок, а также при адгезии частиц. Электрическая сила подвергается изменению путем модификации поверхности.

Электрическая сила является следствием адгезии и проявляется не во всех видах адгезии. Она порождена адгезией и обнаруживается после нарушения адгезионного контакта.

Итак, все причины адгезии можно разделить на две группы: возникающие *в процессе* и *после* контакта. Электрическая сила возникает после контакта двух тел.

НОГИ И КРЫЛЬЯ РАСТЕНИЙ

Связь между разнородными телами осуществляется по определенной площади. Роль площади контакта в формировании этой связи можно наглядно показать на примере адгезии частиц.

Представим себе небольшой стальной шарик, применяемый в шарикоподшипниках. На горизонтально рас-

положенной стеклянной поверхности подобный шарик будет находиться в состоянии покоя. Стоит немного наклонить поверхность, и шарик будет двигаться в сторону наклона. Шарик имеет две степени свободы, его связь с поверхностью стекла не является препятствием для перемещения.

Теперь представим, что стальной шарик помещен на асфальт. Асфальт имеет неровности, и на наклонной поверхности шарик сможет двигаться только при определенных условиях — в зависимости от массы шарика, глубины выемок, угла наклона поверхности. Если вместо асфальта будет грунт, то шарик, попав в углубление грунта, задержится там и не в состоянии будет двигаться даже при значительном наклоне поверхности.

Причина различных условий движения шарика заключается в величине площади контакта шарика с этими поверхностями. На стеклянной поверхности площадь контакта будет минимальной, большей она становится на асфальте, а на грунте площадь контакта принимает максимальное значение.

Нечто подобное происходит при адгезии частиц. Сначала рассмотрим адгезию гладких сферических частиц к гладкой поверхности. Этот случай реализуется при адгезии оплавленных стеклянных частиц к стеклянной поверхности. Кстати, идеально гладкие стеклообразные сферические частицы диаметром, не превышающим 100 мкм, покрывают поверхность Луны.

Сила адгезии, возникающая при контакте частиц с поверхностью, прижимает прилипшие частицы и действует как своеобразная прижимающая сила F_n (см. рис. 15, а). Под действием этой силы происходит деформация зоны контакта и возникает определенная площадь контакта. Эта площадь представляет собой круг.

Для стеклянной шарообразной частицы диаметром 25 мкм площадь контакта на стеклянной поверхности составляет $2 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$, или 200 нм^2 , а радиус равен $8 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}$, или 8 нм. Величина радиуса в этих условиях в десятки раз превышает размеры молекул, а контакт двух поверхностей незначительный (см. табл. 1). Для более крупных частиц, например диаметром 90 мкм, площадь контакта увеличивается и составляет $1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, а радиус — 58 нм, т. е. более значителен.

Приведенные значения площади контакта частиц с поверхностью получены путем расчета и являются прибли-

женными. Непосредственное измерение площади контакта частиц с поверхностью связано с большими экспериментальными трудностями и до настоящего времени еще не проведено. Поэтому о фактическом значении площади контакта можно говорить лишь приближенно.

Форма площади контакта и ее размер определяются соотношением между упругими свойствами материала частиц и поверхности. На рис. 15, а приведена плоская форма контакта. В зависимости от соотношения между свойствами контактирующих тел может быть реализована вогнутая форма контакта в виде лунки (рис. 15, б). Лунка характерна для контакта стального шарика с асфальтом; на грунте глубина этой лунки более значительна.

Деформация зоны контакта увеличивает площадь соприкосновения двух тел, что, в свою очередь, способствует росту адгезии. Величина деформации и площадь контакта зависят от упругих свойств поверхности. Для твердых тел, даже в случае адгезии относительно крупных частиц, деформация зоны контакта незначительна и мало влияет на адгезию. По мере снижения твердости может происходить сплющивание зоны контакта, образование выемов, рост площади контакта и адгезии. В некоторых случаях сила адгезии за счет увеличения площади контакта в результате деформации может значительно, в десятки раз, превосходить силу адгезии, которая имеет место в отсутствие деформации зоны контакта.

Увеличение площади контакта и адгезии помогает растениям пересекать океаны, хотя ни ног, ни колес, ни крыльев у них нет. Обыкновенный подорожник был завезен из Европы во вновь открытый континент — Америку. Завоеватели и первые поселенцы выходили на новый берег в грязных сапогах и замасленной одежде. К грязи и слою масла прилипали семена подорожника.

Обратным путем на наш континент проник еще в начале века злостный сорняк — амброзия, который засоряет поля и вызывает у людей аллергические заболевания. Особенно много очагов сорняка появилось после минувшей войны. Семена его еще раз были случайно занесены уже на колесах «студебеккеров», известных американских грузовиков военного времени.

Площадь контакта представляет одну из важнейших количественных характеристик адгезии. Чем больше эта площадь, тем значительнее адгезия.

Таким образом, величина адгезии определяется не

только теми силами, которые возникают между конденсированными телами, но и площадью, на которой проявляются эти силы.

Адгезия частиц, жидкости и пленок зависит от величины площади контакта. В каждом из видов адгезии формирование площади контакта и ее влияние на адгезионное взаимодействие проявляется по-разному. В случае адгезии частиц эта площадь зависит от упругих свойств материала поверхности и частиц. На этом основании можно отметить:

место возникновения — площадь контакта, определяемая упругими свойствами частиц и поверхности.

КАЖУЩЕЕСЯ ПРОТИВОРЕЧИЕ

Сила адгезии частиц может быть пропорциональна размерам этих частиц. Подобная закономерность следует из уравнения (21), когда за адгезию ответственны лишь межмолекулярные силы. Прямая пропорциональность между силой адгезии и размерами частиц наблюдается экспериментально в тех случаях, когда исключается влияние других факторов: шероховатости, электрического поля и др.

Прямая пропорциональность между силами адгезии и размерами частиц означает, что для относительно крупных частиц сила адгезии больше по сравнению с силой адгезии мелких частиц. Между тем мелкие частицы удерживаются прочнее.

Частицы сахарного песка, например, размер которых значительно превышает размер частиц сахарной пудры, обычно полностью удаляются из пакетов; в противоположность им частицы сахарной пудры покрывают пакет тонким трудноудаляемым слоем.

Чем же объяснить это на первый взгляд кажущееся противоречие между адгезией частиц различного размера?

Необходимо различать силу адгезии, определяющую связь частиц с поверхностью, и относительную силу адгезии. Эта сила в расчете на единицу веса частицы определяет способность частиц прилипнуть, т. е. удержаться на поверхности.

Сила адгезии в расчете на одну частицу у крупных частиц может быть больше, чем у мелких. Определяющее значение в удержании частиц имеет не абсолютное значение сил адгезии, а соотношение между силой адгезии и весом частиц.

Вес частиц равен:

$$P = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g, \quad (24)$$

где m , r и ρ — масса, радиус и плотность частиц соответственно; g — ускорение свободного падения.

Вес частиц пропорционален кубу их радиуса, т. е. r^3 . В соответствии с формулой (21) молекулярная компонента сил адгезии пропорциональна радиусу частиц. По мере увеличения размеров частиц вес частиц растет быстрее сил адгезии. Если, например, радиус частиц увеличивается в 2 раза, то сила адгезии только удваивается, а вес частиц растет в 8 раз. Для определенной системы частицы—поверхность существуют частицы такого размера, сила адгезии которых становится меньше веса этих частиц. Относительно крупные частицы не в состоянии удержаться на поверхности и удаляются под действием собственного веса.

Поясним сказанное примером. Сила адгезии стеклянных шарообразных частиц диаметром 10 мкм примерно в 7700 раз превышает вес самой частицы. Иное дело для относительно крупных частиц, диаметром 120 мкм. Вес подобных частиц составляет $2,2 \cdot 10^{-8}$ Н, а сила взаимодействия — всего $8,8 \cdot 10^{-9}$ Н, т. е. меньше веса самих частиц. Крупные частицы легко удаляются с поверхности. При отрыве частиц необходимо приложить силу $F_{\text{отр}}$ (см. рис. 10), равную и противоположно направленную силе адгезии. Подобная сила сообщает частице массой m ускорение j . Если отрыв частиц, например, осуществляется под действием центробежной силы, то в данном случае j будет центробежным ускорением. Сила отрыва частиц равна:

$$F_{\text{отр}} = F_{\text{ад}} = mj, \quad j = F_{\text{ад}}/m. \quad (25)$$

Ускорение, при котором происходит отрыв частиц, можно выразить в единицах ускорения свободного падения, или ускорения силы тяжести g . Для этой цели необходимо левую и правую части равенства разделить на g . Правая часть этого уравнения, $F_{\text{ад}}/mg$, будет характеризовать превышение силы адгезии над весом. Отношение j/g в левой части показывает, во сколько раз ускорение при отрыве частиц должно превышать ускорение свободного падения.

В рассмотренном примере для отрыва частиц диаметром 10 мкм необходимо приложить ускорение, равное

7700 *g*, т. е. в 7700 раз больше ускорения свободного падения. Удаление частиц диаметром 120 мкм осуществляется при ускорении, которое равно 0,4 *g*, т. е. меньше ускорения свободного падения. Частицы диаметром 120 мкм удаляются с поверхности под действием своего веса.

Приведенное сравнение вскрывает причину более прочного удержания относительно мелких частиц.

Итак, чем меньше размер частиц, тем больше сила адгезии превышает их вес и тем прочнее удерживаются они на поверхности.

ПРИНЦЕССА НА ГОРОШИНЕ

Вспомним известную сказку Андерсена о капризной принцессе, кожа которой была способна ощущать горошину через двадцать тюфяков плюс двадцать пуховиков. Чувствительность адгезии к неровностям поверхности не идет ни в какое сравнение с чувствительностью принцессы. Ощутить горошину через тюфяки и пуховики просто невозможно. Сами тюфяки и пуховики, точнее, их обшивка имеют определенную неровность: выступы, сборки и т. д. Высота выступов может быть незначительной. Принцесса их не ощущает, а прилипшие частицы способны реагировать на эти выступы, да еще как!

Размеры горошин довольно велики: диаметр сухих горошин обычно лежит в пределах 4—7 мм. Высота выступов шероховатых поверхностей колеблется в довольно широких пределах. На металлических и полимерных материалах размеры выступов составляют от нескольких нанометров до нескольких десятков микрометров. Деревянные и некоторые другие поверхности могут иметь выступы, высота которых достигает нескольких миллиметров.

Большинство поверхностей, по отношению к которым имеет место адгезия частиц, шероховаты. Шероховатость характеризуется высотой выступов h и их расположением друг относительно друга l (рис. 16).

Адгезия шарообразных частиц к шероховатым поверхностям зависит от соотношения между размерами выступов и самих частиц.

Шероховатые поверхности по сравнению с гладкими усиливают адгезию мелких частиц и снижают адгезию сравнительно крупных. Мелкие частицы, диаметр которых соизмерим с высотой выступов и расстоянием между ни-

ми, как бы проваливаются в выемы, образованные выступами.

Крупные частицы задерживаются на вершинах выступов. Контакт относительно крупных частиц с выступом, изображенный на рис. 16, можно представить себе как взаимодействие двух гладких тел, поверхность которых характеризуется определенной кривизной. Радиус закругления выступов шероховатой поверхности r_1 и радиус частиц r являются переменными величинами. В этом случае адгезия эквивалентна взаимодействию двух сферических тел. Кроме того, адгезия крупных частиц определяется еще и числом контактов.

Шероховатость поверхности изменяет не только величину адгезии, но и зависимость силы адгезии от размеров частиц. Причем эта зависимость определяется соотношением между диаметром частиц и размерами выступов шероховатой поверхности.

Можно рассмотреть три основных случая. Первый случай имеет место для частиц, диаметр которых d меньше расстояния l между выступами шероховатой поверхности, т. е. $d < l$. Это соответствует положению частицы на рис. 16 во впадине между выступами. Для таких частиц сила адгезии обратно пропорциональна их размерам — чем меньше частица, тем значительнее сила адгезии.

Второй случай соответствует положению частицы на выступах шероховатой поверхности, когда $d > l$. Вспомним Рахметова из романа Н. Г. Чернышевского «Что делать?». Испытывая свою волю, он спал на гвоздях (когда их много, то даже иголки, не прокалывая кожи, в состоянии удержать тело). Такое положение тела как раз соответствует нахождению частиц на выступах шероховатой поверхности. В этом случае сила адгезии пропорциональна размерам частиц. Увеличение размеров частиц влечет за собой рост числа точек контакта частиц с высту-

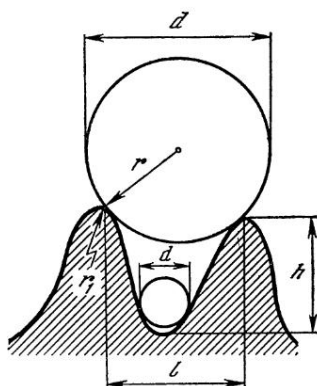


Рис. 16. Адгезия гладких сферических частиц на шероховатой поверхности

пами шероховатой поверхности. В свою очередь, рост точек контакта приводит к увеличению адгезии. Третий случай является промежуточным. Размеры выступов шероховатой поверхности и величина диаметра частиц соизмеримы, т. е. $d \approx l$. Поэтому наблюдается независимость сил адгезии от размеров частиц.

Приведенные примеры показывают, насколько чувствительна адгезия к шероховатости поверхностей. Шероховатость изменяет не только величину адгезии, но и зависимость ее от размеров частиц.

Адгезия частиц неправильной формы к шероховатым поверхностям представляет наибольший практический интерес.

Размеры частиц неправильной формы характеризуются тремя переменными величинами: длиной L , шириной B и высотой H (рис. 17, а). Производить сравнение адгезии частиц неправильной формы по трем различным измерениям не представляется возможным. Поэтому размеры частиц неправильной формы приводят к одному параметру, эквивалентному трем.

Существуют различные способы выражения размеров частиц неправильной формы при помощи одного параметра. Остановимся лишь на некоторых из них, основанных на сопоставлении частиц неправильной формы с шарообразными частицами.

В качестве одного параметра для частиц неправильной формы может быть коэффициент сферичности κ , или, как его иногда называют, седиментационный радиус частиц (седиментация — это оседание частиц в жидкой или газовой среде под действием гравитационной силы). Шарообразные частицы оседают с большей скоростью по сравнению с частицами неправильной формы. Коэффициент сферичности показывает долю скорости оседания частиц неправильной формы по отношению к скорости оседания равновеликих им шарообразных частиц. Равновеликими считают частицы, имеющие одинаковую массу.

Для шарообразных частиц коэффициент сферичности равен 1. Если коэффициент сферичности равен 0,7, то скорость оседания частиц неправильной формы составляет 0,7, или 70%, от скорости оседания шарообразных частиц.

Экспериментально определен коэффициент сферичности по отношению к частицам лёссового грунта. Для частиц неправильной формы его значения колеблются в пределах 0,42—0,9. С уменьшением коэффициента сфе-



Рис. 17. Адгезия частиц неправильной формы на гладкой (а) и шероховатой (б) поверхностях

ричности наблюдается рост адгезии лёссовых частиц примерно в 2 раза — с $3,1 \cdot 10^{-7}$ до $7,8 \cdot 10^{-7}$ Н.

Изменение сил адгезии частиц неправильной формы можно объяснить, если сопоставить рис. 15 и 17, а. Площадь контакта частиц неправильной формы превышает площадь контакта эквивалентных им шарообразных частиц. Чем больше форма частиц отличается от шарообразной и меньше коэффициент сферичности, тем значительнее площадь контакта частиц и сила адгезии.

Размеры частиц неправильной формы можно привести к одной величине, называемой эквивалентным диаметром. Он равен диаметру шара, масса которого равна массе частиц неправильной формы. Для нахождения этой величины массу частиц неправильной формы приводят к массе шара, диаметр которого и является эквивалентной величиной.

Для относительно мелких частиц наблюдается прямая пропорциональная зависимость между силой адгезии и эквивалентным диаметром. С ростом этой величины увеличиваются число контактов на шероховатой поверхности и силы адгезии (рис. 17, б). Относительно крупные частицы, как это видно из рисунка, покоятся на выступах шероховатой поверхности. Рост размеров частиц приводит к увеличению числа и площади контактов. Сила адгезии относительно крупных частиц неправильной формы превышает силу адгезии равновеликих им сферических частиц.

Итак, место возникновения — площадь контакта, определяемая размерами выступов шероховатой поверхности, формой и размерами частиц.

СИММЕТРИЯ И АСИММЕТРИЯ

Площадь контакта определяет величину адгезии жидкости. Рассмотрим положение капли на горизонтальной и гладкой поверхности. Капля на гладкой поверхности симметрична относительно своей оси (рис. 18). Краевой угол по всему периметру капли одинаков, а площадь контакта представляет собой круг радиусом r_k .

Симметрия прилипшей капли является скорее исключением, чем правилом. Для ее осуществления необходимы не только идеально гладкие поверхности, но и энергетически однородные горизонтально расположенные поверхности. Осуществить все эти требования практически трудно.

Шероховатость поверхности нарушает симметрию капли. Проекция капли будет иметь неправильную форму с языками, направленными в сторону выемов поверхности. На шероховатой поверхности измеряют угол наклона сферической части капли по отношению к поверхности твердого тела. Например, этот угол, обозначенный на рис. 19 через $\theta^ш$, определяют в точке B , находящейся на линии смачивания. Угол $\theta^ш$ называют краевым углом на шероховатой поверхности. Он не равен истинному краевому углу.

Сначала рассмотрим адгезию капли на гладкой поверхности. Площадь контакта капли с подобной поверхностью равна:

$$S_k = \pi r_k^2. \quad (26)$$

Площадь контакта капли той же массы на шероховатой поверхности больше по сравнению с площадью контакта на гладкой поверхности (см. рис. 18 и 19). На неровной поверхности часть жидкости будет заполнять имеющиеся выемы. Обозначим площадь контакта капли с шероховатой поверхностью через S'_k .

Увеличение площади контакта капли на шероховатой поверхности по сравнению с гладкой определяют при помощи коэффициента R_Δ , который равен:

$$R_\Delta = S'_k/S_k. \quad (27)$$

При определении коэффициента R_Δ не учтена одна важная особенность — предполагалось, что жидкость полностью заполняет выемы шероховатой поверхности. Фактически это осуществляется далеко не всегда. Проник-

новение жидкости в выемы (рис. 19) может происходить лишь частично. Жидкость остановится, например, на линии CD . Тогда под линией CD будет находиться газ или воздух, а выше этой линии — жидкость. Поэтому необходимо учитывать частичное заполнение жидкостью выемов шероховатой поверхности.

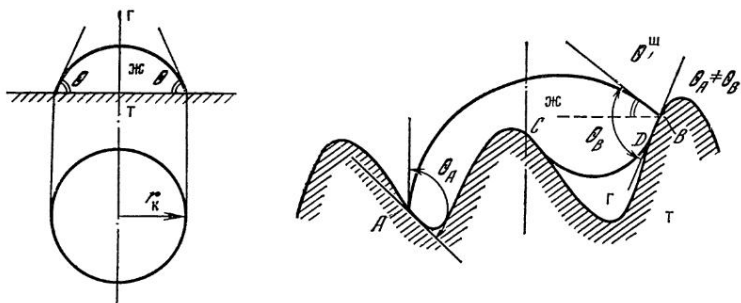


Рис 18. Адгезия симметричной капли на гладкой, горизонтально расположенной поверхности

r_k — радиус площади контакта; θ — краевой угол

Рис. 19. Асимметрия формы капли на шероховатой поверхности

θ_A, θ_B — истинные краевые углы; θ^{III} — измеряемый краевой угол

Обозначим через S''_k часть площади под каплями, которая соприкасается с воздухом. Долю площади выема шероховатой поверхности, не занятой жидкостью, по отношению к площади фактического контакта этой капли с твердой гладкой поверхностью можно представить в следующем виде:

$$\eta = S''_k / S_k. \quad (28)$$

С помощью коэффициента η выражается количественно неполное смачивание и заполнение выемов шероховатых поверхностей.

Неполное смачивание отразится на площади фактического контакта жидкости с шероховатой поверхностью. Эта площадь уменьшится на величину S''_k и будет составлять $S'_k - S''_k$.

Изменение площади контакта жидкости с учетом неполного смачивания выражают при помощи коэффициента R'_Δ , который равен:

$$R'_\Delta = (S'_k - S''_k) / S_k. \quad (29)$$

Коэффициенты R'_Δ и R_Δ дают возможность определить работу адгезии жидкости на шероховатых поверхностях $W_{ад}^ш$ по отношению к работе адгезии на гладких поверхностях $W_{ад}$. Связь между двумя видами равновесной работы жидкости равна:

$$W_{ад}^ш = R'_\Delta W_{ад}. \quad (30)$$

Коэффициенты R'_Δ и R_Δ всегда больше единицы. Поэтому работа адгезии жидкости на шероховатых поверхностях превышает работу адгезии на гладких поверхностях.

Величина истинного краевого угла зависит от места соприкосновения капли с поверхностью. В соответствии с рис. 19 краевой угол в левой части капли θ_A не равен краевому углу в правой части капли θ_B , т. е. $\theta_A \neq \theta_B$. Различные значения краевого угла одной и той же капли называют гистерезисом. Под этим термином подразумевают способность жидкости образовывать с твердым телом несколько устойчивых краевых углов, которые отличаются от равновесного краевого угла, получаемого на гладких и однородных поверхностях. В данном случае гистерезис вызван шероховатостью. Гистерезис является следствием асимметрии капли, которая, в свою очередь, обусловлена выступами шероховатой поверхности.

Гистерезис может проявляться на наклонной поверхности (рис. 20). Под действием гравитационной силы капля теряет симметрию, а краевой угол по периметру смачивания становится неодинаковым. По направлению наклона поверхности в соответствии с рис. 20 можно рассматривать два угла: θ_n и θ_o . Краевой угол нижней части капли, соответствующей направлению движения, называют наступающим, или углом натекания, обозначают θ_n . Краевой угол в верхней части капли называют отступающим, или углом оттеkania, и обозначают через θ_o . Величина угла θ_n превышает θ_o на гладкой поверхности. Капля асимметрична; ее асимметричность обусловлена наклоном поверхности.

Гистерезис смачивания, показанный на рис. 19 и 20 и вызванный шероховатостью или наклоном поверхности, называют статическим. Статический гистерезис не связан с перемещением капель и практически не зависит от времени контакта жидкости с поверхностью. Он может быть вызван не только шероховатостью и наклоном по-

верхности, но и другими причинами, например наличием загрязнений, энергетической неоднородностью поверхности.

Асимметрия капли и ее статический гистерезис зависят от массы капель и угла наклона поверхности. Так, для капель воды массой 0,017 г с увеличением угла наклона поверхности с 12 до 73° наступающий краевой угол увеличивается от 52 до 61°, а отступающий снижается с 32 до 1°. С увеличением угла наклона поверхности наступающие краевые углы растут, а отступающие — убывают.

Помимо статического имеет место кинетический гистерезис смачивания. Он связан с растеканием жидкости и характеризуется изменением краевых углов в зависимости от времени контакта жидкости.

Движение капли начинается при определенном угле наклона поверхности (см. рис. 20). Этот угол называют углом скатывания. Угол скатывания обратно пропорционален массе капель. С увеличением массы капель, например ртути, с 0,008 до 0,136 г угол скатывания по стеклянной поверхности снижается с 90 до 15°.

Шероховатость определяет угол скатывания капель с наклонной поверхности. Решающее значение приобретает не только высота выступов, но и расположение их относительно наклона поверхности и направление движения капель. Выступы могут быть расположены поперек движения капель. В этом случае они создают дополнительные препятствия и являются своеобразными барьерами. Наличие выступов изменяет гистерезисные краевые углы и обуславливает рост угла скатывания капель с шероховатой поверхности по сравнению с углом скатывания тех же капель на ровной поверхности.

Бороздки шероховатой поверхности могут быть расположены вдоль направления движения капель. В этих условиях ситуация изменяется. Продольные бороздки шероховатой поверхности способствуют растеканию и движению капель по наклонной поверхности. Угол скатывания снижается по сравнению с углом скатывания на гладких поверхностях.

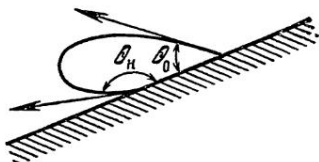


Рис. 20. Форма капли на наклонной поверхности

Краевые углы: θ_n — наступающий или натекания; θ_o — отступающий или оттекания

Наличие выступов шероховатой поверхности определяет не только форму капель, углы гистерезиса и скатывания, но также условие растекания и движения жидкости по этой поверхности. Вам, по-видимому, приходилось наблюдать растекание струек воды, образующихся после дождя. Струйки двигаются не прямолинейно, а по извилистому пути. Они как бы сами себе выбирают наиболее подходящую дорогу. Струйки воды огибают выступы, и порой кажется, что они двигаются случайно. В этой случайности прослеживается определенная закономерность — она связана с расположением выступов и выемов шероховатой поверхности: первые препятствуют, а вторые способствуют растеканию.

Таким образом, неровности оказывают существенное влияние на адгезию жидкости. Они изменяют площадь контакта, работу адгезии и значения краевых углов, а также вызывают гистерезис. Шероховатость влияет на движение жидкости и на ее скатывание с наклонных поверхностей.

НЕПРОМОКАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Многим из вас, по-видимому, приходилось быть в палатке во время дождя. Материал палатки даже в условиях сильного дождя обычно не пропускает воду и представляет собой непромокаемую гидрофобную ткань. Если использовать обычную гидрофильную ткань, то в палатке из подобной ткани нельзя укрыться от дождя. В чем же дело? Для ответа на поставленный вопрос необходимо уяснить особенности смачивания шероховатых гидрофильных и гидрофобных поверхностей.

Краевой угол на шероховатой поверхности $\theta^{\text{ш}}$ связан с величиной краевого угла на гладкой поверхности θ следующим равенством:

$$\cos \theta^{\text{ш}} = R_{\Delta} \cos \theta. \quad (31)$$

Уравнение (31) справедливо при смачивании одной и той же жидкостью гладких и шероховатых поверхностей одного и того же вещества, например при смачивании водой полированной и шероховатой стальных поверхностей. Оно было экспериментально получено Р. Венцелем в 1936 г. и теоретически обосновано Б. В. Дерягиным в 1946 г. Поэтому его называют уравнением Венцеля — Дерягина.

Это уравнение позволяет количественно определить условия смачивания выемов шероховатой поверхности. Коэффициент R_{Δ} , как следует из его сути, всегда больше единицы, т. е. $R_{\Delta} > 1$. На гидрофильной поверхности краевой угол меньше 90° , а косинус его всегда положителен. Нетрудно видеть из уравнения (31), что

$$\cos \theta^{\text{ш}} > \cos \theta, \quad \theta^{\text{ш}} < \theta. \quad (32)$$

Краевой угол на гидрофильной шероховатой поверхности $\theta^{\text{ш}}$ меньше краевого угла этой же жидкости на гладкой поверхности. Шероховатость способствует лучшему заполнению выемов гидрофильных поверхностей. Условие (32) подтверждает количественно то, что ранее было рассмотрено качественно.

На гидрофобных поверхностях краевой угол больше 90° и косинус его всегда отрицателен. Поэтому при $R_{\Delta} > 1$ из формулы (31) получим:

$$\cos \theta^{\text{ш}} < \cos \theta, \quad \theta^{\text{ш}} > \theta. \quad (33)$$

Краевой угол на шероховатой поверхности больше краевого угла на гидрофобной гладкой поверхности. На гидрофобной шероховатой поверхности создаются условия, предотвращающие проникновение жидкости в выемы.

Теперь вернемся к тому, с чего начали: в каких случаях промокает палатка?

Схематически ткань можно представить с помощью рис. 21. Для пояснения сути процесса на рисунке изображена лишь основа ткани, расстояние между нитями показано больше фактического и опущено изображение утка, т. е. нити, идущей поперек основы. Смачивание нитей ткани можно рассматривать по аналогии со смачиванием шероховатых поверхностей: нити эквивалентны выступам этих поверхностей, промежутки между ними — выемам.

Обычный хлопчатобумажный или любой другой целлюлозный материал содержит большое число атомов кислорода и гидроксильных групп и является гидрофильным. По отношению к гидрофильной поверхности ткани краевой угол меньше 90° (рис. 21, б). Вода смачивает нити ткани и проникает в пространство между ними. Это пространство незначительно (на рис. 21 для наглядности оно показано в увеличенном масштабе). Поэтому поры ткани можно рассматривать как маленькие гидрофильные капилляры, которые также способствуют смачиванию (см. рис. 8, б).

Непромокаемые ткани должны быть гидрофобны. Гидрофобностью обладают многие искусственные полимерные материалы. Кроме того, обычным хлопчатобумажным и шерстяным тканям можно придать водоотталкивающие свойства. Для этой цели ткани обрабатывают, например, кремнийорганическими соединениями. В результате подобной обработки гидроксильные группы ткани ($-\text{OH}$), обуславливающие гидрофильные свойства, заменяются на

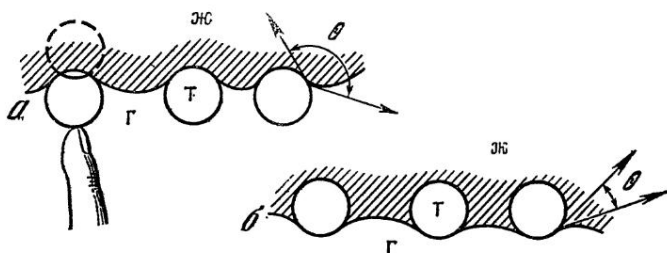


Рис. 21. Смачивание гидрофобной (а) и гидрофильной (б) основы ткани

кремнийуглеводородные группы ($-\text{SiR}_2$ или $-\text{SiR}_3$), которые и сообщают ткани гидрофобные свойства. Гидрофобными следует считать ткани, краевой угол к волокнам которых превышает 90° (рис. 21, а). Гидрофобизация противодействует проникновению воды в выемы. Волокна ткани, подобно выступам шероховатой поверхности, усиливают это противодействие. Гидрофобность в сочетании с выступами волокон делает материал палатки непромокаемым.

Стойкость материала палатки по отношению к воде сохранится до тех пор, пока отсутствует внешнее воздействие. Стоит дотронуться до внутренней стороны палатки и несколько раз провести пальцем по ней, как сложившееся равновесие может нарушиться. Волокна займут положение, показанное на рис. 21, а пунктиром. Нити ткани в этих условиях будут соприкасаться с водой, которая может проникнуть во внутреннюю часть материала палатки.

Непромокаемые материалы используют для изготовления брезентов, тары, одежды, зонтов, обшивок лодок и во всех других случаях, когда необходимо предотвратить доступ воды. Свойства подобных материалов обусловлены противодействием адгезии воды.

Итак, площадь контакта жидкости с твердой поверхностью определяет величину адгезии. В свою очередь, площадь эта зависит от шероховатости твердой поверхности и от ее способности смачиваться. Влияние гидрофобности и гидрофильности на адгезию жидкости можно оценить количественно. Это дает основание повысить степень нашего знакомства с адгезией:

место возникновения — поверхность контакта, определяемая шероховатостью и способностью твердых поверхностей смачиваться.

АРОМАТ ЦВЕТОВ-

Цветы! Они украшают жизнь и приносят эстетическое наслаждение. Кто из вас не любовался прелестью красок и формой цветов?! Особое чувство прекрасного вызывает аромат цветов. Гости Кисловодска, например, на всю жизнь запомнят благоухание цветов долины роз. Запах земли, травы и свежести характерен для полевых цветов.

Аромат цветов распространяется сравнительно на большое расстояние. Одной из причин этого является диффузия*. Диффузия в данном случае обусловлена проникновением молекул из области более высокой концентрации в область, где концентрация молекул значительно ниже. Молекулы эфирных масел, которые определяют особый аромат роз, распространяются из области большей концентрации, которая находится в непосредственной близости от цветов, в область, где эти молекулы отсутствуют или их мало. Подобное распространение может происходить самопроизвольно даже в отсутствие движения воздуха — в помещении или на открытом воздухе в безветренную погоду. Диффузия помогает ощутить аромат цветов на значительном расстоянии от них.

Диффузия имеет прямое отношение к адгезии пленок, в том числе и полимерных. Площадь контакта пленки с поверхностью, формирование этой пленки в процессе затвердевания раствора или расплава, а также те процессы, которые происходят в ходе образования прилипшей

* Перемещение атмосферы происходит за счет ветра, иных механических движений и конвективных потоков, вызванных различной температурой. Все эти перемещения больших и малых воздушных масс сопровождаются и молекулярным перемешиванием — диффузией.

пленки, непосредственно определяют величину адгезии. Диффузия имеет место при контакте жидких металлов с твердыми поверхностями и влияет на адгезию этих металлов.

Адгезия пленок прежде всего зависит от того, насколько раствор или расплав адгезива копирует твердую поверхность. В отношении ровной и гладкой поверхности никаких проблем не возникает. Обычные поверхности

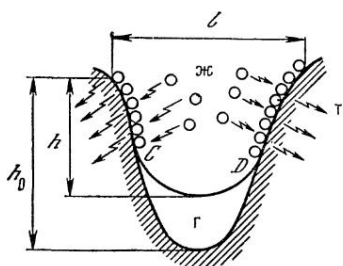


Рис. 22. Заполнение выема, адсорбция и диффузия

шероховаты, а жидкий адгезив имеет значительную вязкость, в десятки и сотни раз превышающую вязкость воды. Площадь контакта в этом случае определяется степенью заполнения расплавом или раствором выемов шероховатой поверхности (рис. 22).

Для получения отпечатка монеты на пластине, например, необходимо определенное усилие. Четкий отпечаток монеты получают в условиях достаточного контакта пластины с поверхностью монеты и заполнения всех выемов.

Нечто подобное имеет место при контакте вязкого адгезива с шероховатой поверхностью. Особенности заполнения выемов вязкой жидкостью рассмотрены в конце 1960-х годов московским ученым В. Е. Гулем в микрореологической теории. Реология изучает процессы течения различных тел. Суть теории сводится к тому, что формирование площади контакта и адгезионная прочность образующихся пленок зависят от микрореологических процессов затекания адгезива в выемы, трещины и поры субстрата, имеющие микроскопические размеры. Согласно представлениям этой теории заполнение выемов глубиной h и шириной l (рис. 22) определяется следующим соотношением:

$$h/l \sim (P\tau/\eta)^{1/2}, \quad (34)$$

где P — внешнее давление на слой адгезива; τ — время заполнения выема; η — вязкость жидкого адгезива.

Площадь контакта и степень заполнения выемов определяются величиной h , которая зависит от соотношения

$(P\tau/\eta)^{1/2}$. Это соотношение показывает, что для формирования контакта, во-первых, необходимо определенное время, а во-вторых, чем больше вязкость адгезива, тем труднее этот контакт осуществить. Внешнее давление, как в случае отпечатка на пластине, способствует лучшему заполнению выемов.

Итак, формирование площади контакта и величина адгезии будут определяться степенью заполнения выемов и неровностей твердых поверхностей раствором или расплавом адгезива.

На границе между жидким адгезивом и твердой поверхностью может происходить избирательное концентрирование некоторых веществ из объема жидкой фазы, т. е. их адсорбция на поверхности. Адсорбция связана с перемещением молекул из объема к границе раздела фаз, что показано на рис. 22. На границе раздела жидкость—твердое тело увеличивается концентрация растворенного в жидкости вещества.

Адсорбция создает условия для регулирования адгезии. В состав жидкого адгезива можно вводить вещества, которые адсорбируются на границе раздела фаз и вызывают повышенную адгезию. Именно таким образом поступают для усиления адгезии полимеров к различным материалам. Адсорбция определяется концентрацией растворенных веществ, природой растворителя, молекулярной массой полимера, температурой среды и рядом других факторов.

Вернемся теперь к процессу диффузии. Часть адгезива может проникнуть в субстрат через зону контакта (рис. 22). В случае адгезии полимеров, например, диффузия наблюдается в отношении макромолекул, представляющих совокупность большого числа атомов и имеющих сравнительно большие размеры. Макромолекулы полимеров или отдельные части макромолекул, подобно молекулам эфирных масел цветов, распространяются самопроизвольно из области высокой концентрации в область низкой. Причем может иметь место не только диффузия макромолекул из адгезива в субстрат, как это показано на рис. 22, но и диффузия макромолекул субстрата в адгезив. В данном случае речь идет о взаимной диффузии.

В результате диффузии происходит размывание границы раздела фаз и образование своеобразной «спайки». Площадь контакта между адгезивом и субстратом увеличивается, что обуславливает значительный рост адгезии.

Диффузионные процессы происходят в определенных условиях. Для осуществления диффузии необходимо взаимное растворение адгезива и субстрата, а также определенная подвижность макромолекул полимера. Эти условия не всегда соблюдаются. Поэтому диффузионные процессы проявляются в отношении ограниченного числа систем, например полиэтилен—полиизобутилен, натуральный каучук—натрийбутадиеновый каучук и некоторые другие.

Из сказанного следует, что влияние на адгезию самопроизвольной односторонней или взаимной диффузии проявляется сравнительно редко. Чаще адгезия зависит от адсорбционных процессов, которые, однако, не во всех случаях оказывают существенное влияние на адгезию пленок.

Адсорбция паров на твердой поверхности и растворенных в жидкости веществ на границе с твердым телом может оказывать влияние на форму капли (см. рис. 7), величину краевого угла и адгезию.

Адсорбционные и диффузионные процессы, являясь следствием контакта двух тел и адгезии, в свою очередь, самым активным образом могут влиять на величину адгезии. Адсорбция и диффузия создают предпосылки для адгезии. Сама же адгезия осуществляется в результате межмолекулярного, химического и других видов взаимодействия, речь о которых шла выше.

Химическое взаимодействие, которое осуществляется за счет химической связи между контактирующими телами, может значительно увеличить адгезию пленок. Например, обычный полиэтилен не прилипает к целлофану. После хлорирования полиэтилена может возникнуть химическая связь между гидроксильными группами целлофана и функциональными группами модифицированного полиэтилена, что резко увеличивает адгезию. Высокая адгезия некоторых полимеров к металлу, стеклу и дереву возникает за счет химической связи после ввода в эти полимеры различных функциональных групп: карбоксильных — COOH , гидроксильных — OH , нитрильных — CN и аминных — NH_2 . В результате адсорбции и диффузии на границе раздела образуется особый межфазный граничный слой, который в некоторых случаях определяет тип отрыва пленок: адгезионный, когда нарушается граница раздела адгезив—субстрат (см. рис. 12), и когезионный при сохранении границы раздела и нарушения целостно-

сти самой пленки (см. рис. 2, отрыв по линии *ББ*). Тип отрыва не изменяет существа адгезии. Причины адгезии остаются теми же. Тип отрыва показывает лишь соотношение между адгезией и когезией.

Подробно исследовано влияние на адгезию микрореологических процессов, адсорбции, диффузии и свойств граничных слоев. Результаты этих исследований представлены в виде обобщений (см. литературу). Разработаны практические рекомендации по усилению адгезии пленок, в частности, в процессе склеивания, о котором речь пойдет ниже.

ПОЧЕМУ КЛЕЙ СКЛЕИВАЕТ?

Возможности клея безграничны. С помощью клея можно изготавливать и ремонтировать обувь, обеспечивать настил полов, создавать мебель, залечивать раны, восстанавливать разбитые изделия, скреплять детали и выполнять многое другое. Различные виды клеев используют для склеивания металлов, древесины, кожи, полимерных материалов, бумаги, фанеры и других материалов. Клей одинаково необходим школьнику и учителю, рабочему и инженеру, студенту и профессору, т. е. практически всем.

Клей проявляет себя на воздухе и в воде, в условиях вакуума и при повышенном давлении, в жару и холод — словом, во всех тех условиях, которые встречаются в технике и в повседневной жизни. Клеи могут находиться в различных физических состояниях в виде расплава, раствора, порошка и др. Несмотря на многообразие склеиваемых материалов и на различия в составе клея, процесс склеивания в общем один и тот же.

Почему же клей склеивает? В чем особенности процесса склеивания? Для уяснения этого вопроса обратимся к рис. 23.

Каждая из склеиваемых поверхностей обычно называется субстратом, а слой клея между ними — адгезивом. После нанесения слоя клея (адгезива) склеиваемые поверхности (субстраты) скрепляют друг с другом. Связь между поверхностями осуществляется в результате тех превращений, которые происходят в адгезиве.

Процесс склеивания можно разделить на несколько стадий. Первая стадия заключается в нанесении слоя клея (рис. 23, *а*) и образовании зоны контакта между субстратом и этим слоем (рис. 23, *б*). Во второй стадии формирует-

ся адгезия между поверхностью и клеем (рис. 23, б). Третья стадия связана с возникновением когезионной прочности слоя клея между двумя склеиваемыми поверхностями 1 и 1' (рис. 23, в). Эти стадии не обязательно идут в строгой последовательности, но разграничение процесса

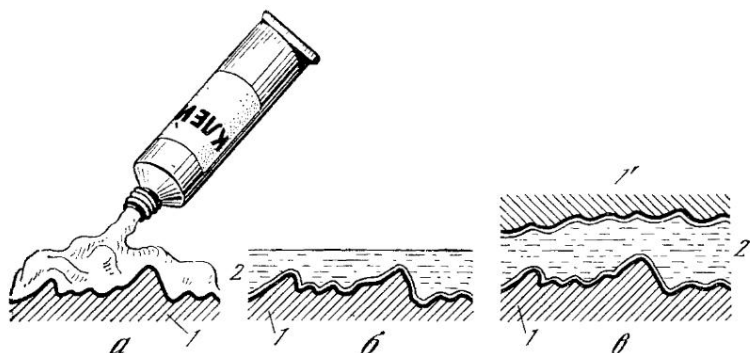


Рис. 23. Процесс склеивания

а — нанесение клея; б — формирование зоны контакта; в — возникновение связи между двумя поверхностями. 1, 1' — субстраты, 2 — адгезив

склеивания на стадии позволяет более четко уяснить роль адгезии и когезии при формировании клеевых соединений.

Рассмотрим стадии процесса склеивания более подробно; в первой из них образуется контакт между клеем и поверхностью. Обычно склеиваемые поверхности имеют неровности. Неровность склеиваемой бумаги иногда трудно обнаружить. Излом разбитой фарфоровой чашки виден каждому. Неровность и шероховатость способствуют увеличению площади контакта между адгезивом и субстратом и усилению адгезии.

В некоторых случаях применяют специальные меры для создания шероховатой поверхности: обработку наждачной бумагой, травление металлов и стекол, фрезерование и т. п. Рост шероховатости субстрата целесообразен до определенного предела. Значительные выемы, трещины и кратеры будут заполняться жидким клеем медленно и не полностью. Фактическая площадь контакта адгезива с поверхностью может даже уменьшиться.

Образование площади контакта между клеем и поверхностью непосредственно связано с особенностями смачи-

вания поверхностей, в том числе и шероховатых, и зависит от свойств самого клея. Ранее рассмотренные представления (см. рис. 19 и 22) по смачиванию и микрореологическим процессам при заполнении выемов шероховатых поверхностей полностью применимы к клею.

Особые трудности возникают при смачивании гидрофобных материалов, к которым относятся полимеры. Для склеивания подобных материалов применяют клеи, в состав которых входят добавки, улучшающие смачивание.

Наносимый слой клея прежде всего должен копировать рельеф поверхности субстрата (рис. 23, б). Выполнить это условие непросто. Обычно клей представляет собой довольно вязкую систему. Вязкость отдельных марок клея может в сотни раз превышать вязкость воды. Подобные системы согласно представлениям о микро-реологических процессах трудно заполняют выемы поверхностей. Поэтому для формирования зоны контакта между жидким адгезивом и субстратом приходится применять дополнительные меры. Нанесение слоя клея таким простейшим способом, как, например, кисточкой, обеспечивает одновременно и равномерность, и создание определенного давления на слой клея. Это давление, в свою очередь, способствует проникновению клея в выемы поверхности. Улучшить процесс заполнения выемов можно путем снижения вязкости клея. Это достигается нагреванием самого клея или склеиваемых поверхностей.

При использовании коллоидного клея, в состав которого входят высокодисперсные порошки, на склеиваемые детали воздействуют вибрацией. Вибрация разрушает образующуюся структуру, снижает вязкость клея и способствует формированию зоны контакта. После снятия вибрации структура клея восстанавливается, что и обуславливает возникновение далее когезионной прочности.

Для лучшего формирования зоны контакта склеиваемые детали определенное время держат под давлением. Какие бы меры не принимали для лучшего заполнения выемов шероховатой поверхности, для формирования зоны контакта необходимо определенное время. Следует отметить, что непосредственный контакт клея с поверхностью осуществляется лишь тогда, когда эти поверхности тщательно очищены от различных загрязнений. Первая стадия процесса склеивания является подготовительной — она создает необходимое условие контакта клея к поверхностям, которые подвергаются склеиванию.

Вторая стадия процесса склеивания связана с возникновением адгезии между жидким клеем и твердой поверхностью. Нельзя упрощенно считать, что вторая стадия следует за первой. В определенный период времени эти две стадии могут сосуществовать. Вторая стадия начинается с момента нанесения клея на поверхность. В результате контакта между молекулами адгезива и субстрата возникает связь, прочность которой определяется межмолекулярным и химическим взаимодействиями, т. е. теми причинами, которые обуславливают адгезию пленок. На формирование адгезии оказывают влияние процессы адсорбции и диффузии, о которых говорилось выше. Адгезия становится максимальной после формирования площади контакта в условиях, когда слой клея копирует рельеф поверхности.

Третья стадия определяет суть всего процесса склеивания. Слой жидкого клея между двумя твердыми поверхностями (рис. 23, е) не в состоянии противодействовать разъединению этих тел. Все знают, что для прочного склеивания сам клей должен высохнуть. Но не все представляют, что происходит при затвердевании слоя клея. Слой жидкого клея не только превращается в твердый, но и приобретает когезионную прочность. Одновременно на границе раздела адгезив—субстрат вместо жидкого клея возникает твердая поверхность. Адгезия уже осуществляется между двумя разнородными твердыми телами.

Возникновение когезионной прочности связано с особенностями применяемого клея. По механизму образования когезионной прочности все клеевые композиции обычно разделяют на две группы: термопластичные и необратимо отверждающиеся.

В термопластичных композициях происходят испарение растворителя, отверждение расплава и другие физико-химические процессы. Когезия возникает в результате отверждения клеевой массы. Отвержденный слой клея сохраняет ранее существовавшую в жидком клее линейную или разветвленную структуру. Это обеспечивает способность клеевого соединения сравнительно легко растворяться в органических растворителях.

Особенности формирования когезионных связей определяют практическое использование термопластичных композиций. Ограниченные возможности в отношении когезионной прочности, теплостойкости и противодействия

агрессивным средам обуславливают применение подобных типов клеевых композиций главным образом в мало-нагруженных конструкциях.

Необратимо отверждающиеся клеи отличаются от термопластичных композиций тем, что после отверждения образуют не линейную, а сетчатую структуру. Сам процесс отверждения происходит под действием входящих в состав клея отвердителей. Отверждение может осуществляться при обычной температуре и сравнительно быстро. Подобные композиции многокомпонентны, хотя и не содержат растворителей. В состав клея входят вспомогательные вещества, главным из них является отвердитель, который взаимодействует с основным компонентом и способствует образованию сетчатой структуры.

В зависимости от температуры отверждения клеевые композиции делятся на две группы: холодного и горячего отверждения. Для клеев холодного отверждения процесс идет при комнатной температуре и довольно быстро. Клеи горячего отверждения приобретают сетчатую структуру только при повышенной температуре, обычно 100—200° С. Скорость отверждения подобных композиций в обычных условиях незначительна, что определяет большое «время жизни клея», исчисляемое месяцами и даже годами.

Клеевые композиции горячего отверждения могут быть приготовлены на заводе и в готовом виде доставляться потребителю. Клеи холодного отверждения имеют весьма ограниченное время жизни, исчисляемое 0,5—3 часами. Поэтому приготовление клеевых композиций, которое заключается в добавке отвердителя, проводится непосредственно перед склеиванием. Это создает известные неудобства.

В настоящее время разработано много различных композиций необратимо отверждающихся клеев; в частности, для склеивания в особых условиях: в вакууме и в Космосе, при повышенной и пониженной температуре, под водой и в агрессивных средах.

Отдельную группу составляют так называемые резиновые клеи. Эти клеи представляют собой растворы каучуков или резиновых смесей в органических растворителях. Они применяются для склеивания резины и прорезиненных материалов, крепления резины к металлам, дереву, стеклу, полимерным и другим материалам. Некоторые из резиновых клеев предназначены для последующей терми-

ческой вулканизации, и в этом смысле их можно причислить также к клеям горячего отверждения.

Во всех клеевых композициях когезионная прочность клеевого соединения образуется в результате отверждения, происходящего либо за счет удаления растворителя и охлаждения, либо в результате действия отвердителей.

Отверждение клея обычно связано с уменьшением его объема. Иногда можно наблюдать, что склеенные между собой листы бумаги подвергаются короблению. Причина заключается в усадке слоя клея после его отверждения. Если усадка возникает при склеивании металлических и других деталей, то в слое клея могут появиться внутренние напряжения, которые иногда оказывают пагубное влияние на когезионную прочность клея.

Где бы ни применялся клей, как бы ни отличались условия склеивания, процесс образования клеевого соединения всегда будет одним и тем же: возникновение адгезионной связи между двумя склеиваемыми соединениями и прослойкой клея с одновременным формированием когезионной прочности в этой прослойке.

Итак, продолжая знакомство с адгезией, отметим: *склеивание* — процесс возникновения адгезии слоя клея к двум поверхностям и когезионной прочности в этом слое.

ЗАПАХ ГРОЗЫ И ВАКУУМ ЛУНЫ

Ряд признаков характеризует надвигающуюся грозу: барометрическое давление становится ниже нормального атмосферного, повышается относительная влажность воздуха, усиливается ветер, понижается температура. Эти объективные показатели не только ассоциируются с «запахом» грозы, но и определяют состояние и свойства воздушной среды, которые влияют на адгезию. Подобное влияние можно наглядно показать на примере адгезии частиц.

Рассмотрим сначала зависимость адгезии от влажности воздуха. Содержание влаги в воздухе выражают в абсолютных и в относительных единицах. В последнем случае за 100% принимают влажность воздуха, парциальное давление паров воды в котором соответствует давлению насыщения при данной температуре. Относительной влажностью воздуха называют отношение давления фактически находящегося в воздухе водяного пара к давлению

водяного пара, насыщающего объем при той же температуре.

Давление насыщенных паров изменяется в зависимости от температуры воздуха. Выпадение росы и образование тумана в утренние часы вызвано понижением температуры, снижением давления насыщенных паров воды

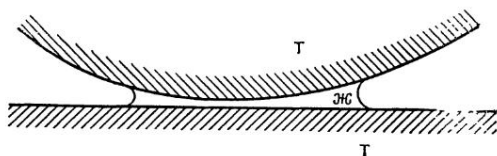


Рис. 24. Прослойка жидкости, образующаяся в зазоре между частицей и поверхностью за счет капиллярной конденсации

в воздухе и, следовательно, конденсацией паров с образованием капель воды.

Нечто подобное, т. е. конденсация паров воды, происходит при адгезии частиц. Образующийся мениск жидкости в зазоре между контактирующими телами (рис. 24) оказывает решающее влияние на адгезию. Он как бы стягивает частицу и поверхность. Величина адгезии частиц в этом случае будет определяться капиллярной силой, которая рассчитывается по формуле

$$F_R = 4\pi\sigma_{жг}r \cos \theta. \quad (35)$$

В данном случае $\sigma_{жг}$ — поверхностное натяжение воды, пары которой сконденсированы между контактирующими телами, а θ — краевой угол.

Капиллярная компонента включается в формирование адгезии при определенной относительной влажности воздуха. Когда относительная влажность воздуха не превышает 50%, капиллярная конденсация отсутствует. При росте относительной влажности с 50 до 70% наблюдается формирование капиллярной прослойки, а при относительной влажности воздуха свыше 70% именно капиллярные силы обуславливают величину адгезии частиц.

В пустынях и полупустынях, например, где относительная влажность незначительна, капиллярные силы не оказывают заметного вклада в величину адгезии. В районе Батуми относительная влажность воздуха редко бывает менее 70%. Капиллярные силы в этом случае вклю-

чаются в образование адгезионного взаимодействия и могут превышать другие компоненты сил адгезии.

На земной поверхности имеется значительное число мест, которые характеризуются повышенной относительной влажностью и высокой температурой воздуха. Подобное состояние воздуха оказывает существенное влияние на адгезию частиц.

Возникновение капиллярной компоненты сил адгезии связано с величиной зазора между частицей и поверхностью, который в увеличенном масштабе показан на рис. 24. Непосредственно в зоне контакта величина зазора составляет десятые доли нанометра, а в зоне, обрамляющей контакт, эта величина может увеличиваться до единиц, десятков и даже сотен нанометров. Зазоры таких размеров называются капиллярными.

В зазорах подобных размеров происходит капиллярная конденсация, т. е. конденсация паров в жидкость при давлениях, которые меньше давления насыщенного пара. Между частицей и поверхностью образуется жидкая прослойка воды при относительной влажности воздуха, меньшей 100%.

Необходимым условием образования вогнутых менисков и капиллярного притяжения частиц является смачивание, т. е. гидрофильность контактирующих поверхностей. На предельно гидрофильных поверхностях, когда $\theta = 0$ и $\cos \theta = 1$, в соответствии с формулой (35) капиллярная сила принимает максимальное значение. По мере гидрофобизации поверхности вклад капиллярной компоненты в формирование адгезионного взаимодействия снижается. Когда краевой угол достигает 90° ($\cos \theta = 0$), капиллярная сила уже не оказывает влияния на адгезию частиц.

В воздушной среде капиллярные силы формируются не сразу — на это требуется до получаса. На увлажненной же поверхности капиллярные силы возникают почти мгновенно. Их действие можно ощутить во время уборки помещений при помощи пылесоса. С сухой поверхности загрязнения удаляются сравнительно легко; если поверхность немного увлажнена, то очистить ее от загрязнений не так-то просто. Причина заключается в возникновении капиллярных сил и росте адгезии частиц загрязнений за счет этих сил.

Влажность воздуха оказывает влияние на адгезию пленок и, в частности, на адгезию лакокрасочных покры-

тий. Влага воздуха воздействует на прилипшую пленку и в определенных условиях может проникнуть через слой материала в зону контакта. В этих условиях влага будет влиять на адгезионную прочность прилипшей пленки. При относительной влажности воздуха менее 70% адгезионная прочность пленки, так же как и в случае адгезии частиц, мало зависит от влажности, но при более высокой влажности наблюдается изменение степени адгезии. Действие паров воды на адгезионную прочность пленок отличается от их действия на адгезию частиц. Если в случае частиц с увеличением относительной влажности воздуха наблюдается рост силы адгезии, то адгезионная прочность пленок в этих условиях снижается.

При повышенной относительной влажности воздуха образуется прослойка воды между основой и пленкой. Вода проникает в зазор и действует подобно клину. Это действие будет рассмотрено ниже.

Особенно резко снижается адгезия пленок при относительной влажности воздуха, близкой к 100%. Повышенная температура усугубляет этот процесс. Возможно даже самопроизвольное отслаивание покрытий. Поэтому лакокрасочные покрытия должны противодействовать проникновению влаги и в некоторых случаях быть стойкими к высокой температуре.

Особый «запах» грозы связан с тем, что при электрических разрядах из кислорода воздуха образуется озон. В состав воздуха входят и другие газы. Они взаимодействуют с твердой поверхностью и образуют на них адсорбционные слои. Эти слои, подобно своеобразной одежде, экранируют поверхность и могут в некоторых случаях влиять на величину адгезионного взаимодействия.

Озон адсорбционно активнее кислорода и легче образует на поверхности адсорбционные слои, что может сказаться на снижении адгезии. С другой стороны, будучи весьма химически активным, озон частично окисляет контактирующие поверхности и, формируя полярные группы или кислородные мостики, повышает адгезию за счет химической связи.

Действие адсорбционных слоев на адгезию можно определить путем сопоставления величины адгезии в обычных условиях и в вакууме. В обычных земных условиях давление воздуха составляет 760 мм рт. ст., или приблизительно 10^5 Па. На поверхности Луны, как уже отмечалось, имеется глубокий вакуум. Этот вакуум ($1,3 \cdot 10^{-10}$ — $1,3 \cdot$

$\cdot 10^{-8}$ Па) исключает возможность образования адсорбционных слоев, что приводит к росту величины адгезионного взаимодействия. Именно поэтому американские астронавты не смогли освободиться от прилипших к их одежде частиц лунной пыли.

Вакуум тем более может усилить адгезионную прочность пленок, поскольку одновременно с исключением адсорбционных слоев вакуум способствует удалению влаги из зоны контакта. Это обстоятельство определяет дополнительный рост адгезии пленок.

Адсорбция газа на поверхности твердого тела изменяет адгезию жидкости. Это изменение связано, в частности, с тем, что величина поверхностного натяжения твердого тела на границе с газовой средой $\sigma_{тг}$ (см. рис. 7) на поверхности без адсорбционного слоя отличается от $\sigma_{тг}^a$ в присутствии адсорбционного слоя.

Адгезия очень чувствительна к температуре окружающей среды. Зимой грунт промерзает. Этот процесс заключается в образовании льда из воды, находящейся между частичками грунта. Следствием смерзания является усиление аутогезии частиц и превращение грунта в единый монолит. Борьба со смерзанием приобретает огромное значение в связи с перевозками в зимних условиях железнодорожным и другими видами транспорта сыпучих материалов: руды, угля, горной массы и т. д.

Для предотвращения смерзания необходимо исключить или уменьшить возможность образования льда между частичками. Это достигается введением химических реагентов, снижающих температуру замерзания воды, прогревом сыпучего материала или механическим воздействием на него.

При повышении температуры окружающей среды до определенного предела наблюдается, как правило, усиление адгезии. В случае адгезии частиц и пленок это связано с размягчением твердых тел и увеличением площади контакта.

Итак, среда, ее температура и состав оказывают влияние на адгезию. Адгезия частиц наиболее чувствительна к влажности воздуха и вакууму.

Продолжая далее знакомство с адгезией, отметим: *влияние окружающей среды* — адгезия зависит от влажности, температуры, давления и состава воздушной среды.

ПОДОБНО КЛИНУ

Обратимся еще раз к житейским будням. Уборку помещений с помощью веника, щетки или пылесоса без участия воды или иных жидких средств относят к категории безжидкостной обработки. Но, как бы ни обрабатывали одежду щетками, рано или поздно ее необходимо подвергать стирке или химчистке, т. е. обработке с помощью воды или растворителей.

Причина малой эффективности безжидкостной обработки по сравнению с жидкостной заключается в значительно большей силе адгезии частиц в воздушной среде.

Снижение адгезии частиц в жидкости по сравнению с адгезией в воздушной среде вызвано особыми свойствами граничных слоев жидкости, находящихся между частицей и поверхностью, т. е. на границе раздела фаз.

Впервые особенности тонкого слоя жидкости на границе раздела фаз еще в 1934 г. обнаружил и изучил Б. В. Дерягин, назвав эти особенности расклинивающим давлением. Расклинивающее давление — это избыточное давление в межфазном слое жидкости (или газа), способное препятствовать дальнейшему утоньшению этого слоя под действием внешних сил.

Расклинивающее давление возникает в жидкой среде на границе раздела фаз и проявляется в ряде свойств дисперсных систем. Мы рассмотрим лишь влияние расклинивающего давления на адгезию частиц в жидкости.

В состоянии равновесия абсолютная величина расклинивающего давления равна:

$$\pi(H) = |P_0 - P|, \quad (36)$$

где $\pi(H)$ — расклинивающее давление в зависимости от толщины слоя жидкости или зазора между частицей или поверхностью, равного H ; P — давление на тонкий слой жидкости со стороны граничных фаз; P_0 — давление в объеме жидкости (рис. 25).

Расклинивающее давление вызвано свойствами граничных слоев жидкости и не связано с вязкостью или какими-либо другими механическими свойствами жидкости.

Расклинивающее давление как всякая термодинамическая величина может иметь различный знак. Оно положительно, когда $(P_0 - P) > 0$. Положительное расклинивающее давление реализуется при пониженном давлении в слое жидкости по сравнению с давлением в объеме:

$P < P_0$. Расклинивающее давление компенсируется избытком внешнего давления. Пониженное давление слоя жидкости препятствует вытеканию жидкости из зазора между частицей и поверхностью и противодействует тем самым их сближению и адгезии. Отсюда и название «расклинивающее» давление, которое, подобно клину, раздвигает контактирующие поверхности. Расклинивающее давление возникает всегда, когда между контактирующими поверхностями есть слой жидкости, толщина которого менее 100 нм.

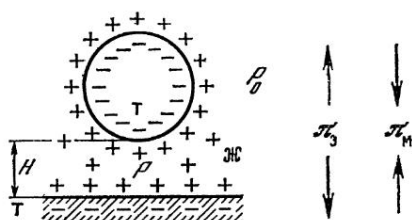


Рис. 25. Схема, поясняющая возникновение расклинивающего давления

P_0, P — давление в объеме и в тонком слое жидкости соответственно

Суть расклинивающего давления можно еще раз пояснить путем сопоставления трех различных случаев контакта частиц с поверхностью: «сухой» контакт в воздушной среде (см. рис. 14, в), при наличии капиллярной прослойки (см. рис. 24) и в жидкой среде (см. рис. 25), которая полностью заполняет зону частиц с поверхностью. Влага воздуха конденсируется и образует прослойку жидкости в капиллярном зазоре между частицей и поверхностью. Сухой контакт заменяется жидкой прослойкой, которая, подобно клею, усиливает адгезию. Когда жидкости много и она способна смачивать частицы, то жидкость проникает между контактирующими телами, раздвигая их.

В случае конденсации паров в зазоре между твердой поверхностью и частицей (см. рис. 24) капиллярная сила обычно превышает расклинивающее давление и определяет адгезию частиц. В жидкой среде происходит подавление капиллярной силы и расклинивающее давление проявляется в полной мере.

Условие (36) является в некотором смысле формальным, так как оно не отражает причин снижения адгезии за счет тонкого слоя жидкости между двумя телами.

Для уяснения причин расклинивающего давления обратимся к рис. 25. В воде имеются электролиты, которые обуславливают образование зарядов на твердых поверх-

ностях. Эти заряды компенсируются ионами, находящимися в растворе. Схема образования зарядов поверхности, частицы и окружающих их ионов раствора приведена на рисунке. В тонком слое жидкости происходит концентрация ионов одного знака, принадлежащих частице и поверхности. Отталкивание одноименных зарядов, которые окружают частицу и поверхность, является причиной возникновения электростатической компоненты, расклинивающего давления π_3 . Молекулы жидкости, непосредственно примыкающие к твердым поверхностям, располагаются в определенном порядке. Возникает особая структура граничного слоя жидкости, которая также препятствует сближению двух тел и их адгезии. Изменение адгезии происходит за счет структурной составляющей расклинивающего давления.

Существуют и другие составляющие расклинивающего давления, которые здесь не рассматриваются.

Помимо отталкивания между контактирующими телами возникает межмолекулярное взаимодействие, которое было рассмотрено ранее. Это взаимодействие способствует сближению двух поверхностей; его обычно обозначают π_m .

Адгезия произойдет в том случае, когда межмолекулярное взаимодействие будет превышать электростатическое отталкивание: $\pi_m > \pi_3$.

Как уже указывалось, сила адгезии частиц в жидкой среде меньше по сравнению с силами адгезии в воздушной среде. Это обусловлено рядом причин, одна из них заключается в том, что в воде в присутствии электролитов происходит утечка образующихся зарядов, что исключает силу зеркального отображения. В жидкой среде не возникает электрическая сила за счет донорно-акцепторных процессов.

Таким образом, в жидкой среде по сравнению с воздушной возникновение расклинивающего давления и исключение ряда компонент адгезионных взаимодействий приводят к значительному снижению сил адгезии частиц. Особенно заметно это снижение для относительно мелких частиц. Так, для частиц диаметром 10 мкм сила адгезии в водной среде почти в 100 раз меньше силы адгезии этих частиц на воздухе. Для более крупных частиц это различие менее существенно.

НЕБОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ—НОВОЕ КАЧЕСТВО

Мощным средством изменения адгезии являются поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые широко используются в различных отраслях промышленности и в быту. Молекулы ПАВ имеют асимметричное, или, как говорят, дифильное, строение. На рис. 26, а приведена схема молекулы валериановой кислоты, являющейся ПАВ.

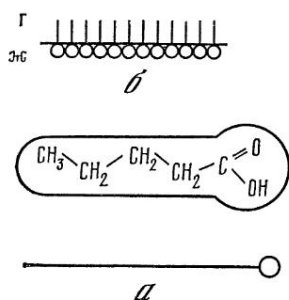


Рис. 26. Строение молекулы валериановой кислоты (а) и адсорбция молекул ПАВ (б) на границе раздела жидкость—газ

Длинная часть молекулы представляет собой углеводородный радикал. Этот радикал является гидрофобным и характеризуется отсутствием сродства к воде. Меньшая часть молекулы ПАВ содержит гидрофильную группу, которая обладает сродством к воде. В данном случае это карбоксильная группа —СООН. Молекула ПАВ изображена в виде черточки с кружком: черточка соответствует гидрофобной части, а кружок — гидрофильной.

Молекулы ПАВ выталкиваются из объема водного раствора на границу раздела фаз и концентрируются на этой границе. Преимущественное нахождение на поверхности раздела фаз, в частности на границе воды с воздухом, обуславливает и их название — поверхностно-активные вещества.

Вследствие дифильного строения молекулы ПАВ адсорбируются на границе воды с воздухом и ориентируются определенным образом. Гидрофильная часть молекул, обладающая сродством к полярным молекулам воды, взаимодействует с водой, а неполярная гидрофобная часть ориентируется в неполярную среду, каковой является воздух.

При достижении определенной концентрации имеет место предельная адсорбция и на поверхности воды образуется монослой, т. е. один ряд адсорбированных молекул ПАВ. На рис. 26, б показан адсорбционный монослой молекул ПАВ на границе раздела вода—воздух.

На рис. 26, а представлена простейшая молекула ПАВ. В настоящее время известны и используются тысячи раз-

личных ПАВ. Молекулы многих ПАВ могут содержать не одну, а несколько гидрофильных групп и вместо одного иметь несколько гидрофобных радикалов.

Адсорбция ПАВ снижает поверхностное натяжение. Поверхностное натяжение воды при температуре 20° С снижается с 72,75 мДж/м² в растворе валериановой кислоты концентрации 0,24% до 42,1 мДж/м². Некоторые ПАВ снижают величину поверхностного натяжения воды до 20—30 мДж/м².

Для изменения поверхностных свойств воды концентрация ПАВ может быть незначительной и составлять десятые доли процента. При помощи небольшого количества водные растворы ПАВ приобретают новые качества.

В зависимости от свойств молекул ПАВ, находящихся в водном растворе, различают неионогенные и ионогенные ПАВ. Неионогенные ПАВ практически не диссоциируют в водных растворах, т. е. не образуют ионов. К числу их относится валериановая кислота (см. рис. 26, а).

Ионогенные ПАВ диссоциируют в водной среде. Поверхностной активностью подобных веществ обладает анион или катион. Отсюда название ПАВ — «анионные» и «катионные». Анионным ПАВ является обычное жировое мыло, в его состав входит натриевая соль стеариновой кислоты (стеарат натрия), в результате диссоциации которой образуется поверхностно-активный анион: $C_{17}H_{35}COONa \rightarrow C_{17}H_{35}COO^- + Na^+$.

ПАВ входят в состав моющих средств, к числу которых относятся стиральные порошки. Для стиральных порошков используют различные синтетические ПАВ, в частности вещество, химический состав которого соответствует додецилсульфату натрия ($C_{12}H_{25}OSO_3Na$), являющееся анионным ПАВ. Поверхностно-активным свойством обладает анион $C_{12}H_{25}OSO_3^-$.

При помощи ПАВ можно регулировать все виды адгезии. Роль адгезии в моющем процессе, осуществляемом при помощи стиральных порошков, рассмотрена ранее.

Снижение поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$ в соответствии с уравнением (9) обуславливает рост $\cos \theta$, что означает снижение краевого угла, усиление адгезии жидкости и улучшение смачивания твердых поверхностей. Поэтому растворы ПАВ используют в качестве многочисленных смачивателей. Смачиватели используются в текстильной, металлообрабатывающей и других отраслях промышленности, а также в сельском хозяйстве и в быту.

Водные растворы ПАВ могут изменять адгезию частиц. Снижение поверхностного натяжения и улучшение смачивания способствуют более полному заполнению зазора между контактирующими телами и образованию прослойки жидкости, что дает возможность наиболее полно проявиться расклинивающему давлению. Кроме того, молекулы ПАВ адсорбируются в зоне контакта частиц с поверхностью. Их однотипные части могут быть обращены

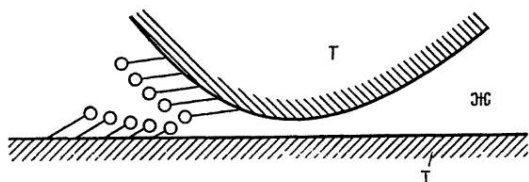


Рис. 27. Адсорбция молекул ПАВ в зоне контакта частицы с поверхностью

в сторону жидкой среды. На рис. 27 показан возможный вариант взаимодействия адсорбционных слоев молекул анионных ПАВ, которые принадлежат различным твердым телам. В результате адсорбции и отталкивания одноименно заряженных частей молекул ПАВ усиливается расклинивающее давление и создаются благоприятные предпосылки для снижения адгезии частиц.

Водные растворы ПАВ оказывают влияние на адгезию пленок. В результате повышенной смачивающей способности эти растворы легче проникают в зазор между адгезивом и субстратом и адсорбируются на границе раздела фаз, подобно тому как это имеет место в случае адгезии частиц (рис. 27).

Кроме того, через слой прилипшей пленки, трещины и другие дефекты жидкость также может проникнуть в зону контакта. Образующийся между адгезивом и субстратом тонкий слой жидкости снижает адгезию пленок. Тонкий слой жидкости обладает расклинивающим действием. Жидкость оказывает влияние на материал прилипшей пленки, что приводит к изменению ее упругости, эластичности и других свойств. Эти свойства в конечном счете оказывают влияние на адгезионную прочность.

Итак, характеристику связи адгезии с окружающей средой можно дополнить следующим: *адгезия зависит от свойств жидкой среды, присутствия ПАВ и расклинивающего давления тонкого слоя жидкости.*

ЯИЧНИЦА БЕЗ МАСЛА И БОРЬБА С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ

Для приготовления яичницы необходимо нагреть сковороду, растопить масло, а затем вылить содержимое яиц. Разве можно приготовить яичницу без масла? Оказывается можно, если использовать материалы, снижающие адгезию.

Разберем все по порядку. Попробуйте приготовить яичницу без масла на обычной сковороде. Продукт пригорает к сковороде и частично обугливается — нарушаются вкусовые качества. Масло выполняет роль прослойки между сковородой и образующейся яичницей. Отсутствие такой прослойки усиливает адгезию к нагретой сковороде, и, как следствие, часть продукта пригорает. Масло не только сообщает яичнице вкусовые качества, оно необходимо для борьбы с адгезией. В процессе приготовления яичницы с поверхностью сковороды сначала контактирует жидкость (содержимое яиц), а затем образуется твердый слой готового продукта. Отсюда следует, что материал сковороды должен иметь в одинаковой степени слабую адгезию и к жидкости, и к образующемуся из нее твердому телу, да еще в нагретом состоянии.

Возможность приготовления яичницы без масла связана с подбором антиадгезионных материалов, отвечающих этим требованиям.

Необходимость использования антиадгезионных материалов возникает в процессе жарения всех гидрофильных продуктов: овощей, в том числе картофеля, мяса, теста и др.

Аналогичная проблема уменьшения адгезии вещества в процессе изменения его фазового состояния возникает и в совершенно иных областях, например при образовании льда после охлаждения воды. Эта проблема неразрывно связана с таким вопросом, как обледенение летательных аппаратов (самолетов, вертолетов и др.). На поверхности этих аппаратов при полетах в переохлажденных облаках, в тумане, дожде и снеге может возникнуть слой льда, который увеличивает массу летательного аппарата, вызывает вибрацию его частей и нарушает аэродинамические характеристики, что отрицательно сказывается на безопасности полетов. Обледенение палубы, аппаратуры, при-

надлежностей и оборудования судов, плавающих в полярных морях, затрудняет нормальную эксплуатацию их.

Один из способов борьбы с обледенением основан на использовании антиадгезионных материалов. Для уяснения принципа создания подобных материалов необходимо рассмотреть некоторые основополагающие представления.

Остановимся на понятии «критическое поверхностное натяжение». Как уже отмечалось, на границе раздела фаз действуют поверхностные натяжения (см. рис. 7). Величина поверхностного натяжения жидкости на границе с газовой средой $\sigma_{жг}$ может определять условия растекания и профиль капли на поверхности. Если поверхностное натяжение $\sigma_{жг}$ сравнительно большое (например, у ртути оно составляет 470 мДж/м²), то капля образует на поверхности краевой угол свыше 90°. Поверхностное натяжение воды при 20° С составляет 72,75 мДж/м², т. е. значительно меньше, чем для ртути. Поэтому краевой угол капли воды будет меньше по сравнению с краевым углом капли ртути.

Можно подобрать такую жидкость, капля которой полностью растекается по поверхности, когда $\theta = 0$, а $\cos \theta = 1$.

Поверхностное натяжение жидкости, соответствующее полному растеканию, называется критическим поверхностным натяжением и обозначается через $\sigma_{кр}$.

В природе подобной жидкости по отношению к конкретной поверхности может и не быть. Однако на основании эксперимента можно предсказать значение критического поверхностного натяжения этой гипотетической жидкости.

Жидкости, поверхностное натяжение которых несколько больше критического, будут образовывать капли на поверхности с краевым углом больше нуля. Поэтому величина критического поверхностного натяжения характеризует переход от ограниченного смачивания, когда $\theta > 0$, к полному смачиванию при $\theta = 0$.

Численные значения критического поверхностного натяжения зависят от свойств твердой поверхности. Для различных поверхностей критическое поверхностное натяжение будет различным. В связи с этим критическое поверхностное натяжение применяют в основном для характеристики твердых тел,

Поверхностное натяжение твердого тела численно равно критическому поверхностному натяжению, т. е.

$$\sigma_{\text{тг}} = \sigma_{\text{кр}} \quad (37)$$

Условие (37) дает возможность не только определить поверхностное натяжение твердых тел, но и разграничить свойства твердых поверхностей по их способности смачиваться.

В зависимости от условий смачивания твердые поверхности можно классифицировать на низко- и высокоэнергетические.

Низкоэнергетические поверхности смачиваются не полностью: на них капли растекаются ограниченно, и реализуется определенный краевой угол (см. рис. 7). Для этих поверхностей можно определить критическое поверхностное натяжение. Высокоэнергетические поверхности смачиваются полностью, а капли на этих поверхностях растекаются в пленку.

Заметим, что условие (37) не выполняется при наличии загрязнений, адсорбционных и других слоев, которые могут экранировать твердую поверхность.

Величина поверхностного натяжения низкоэнергетических поверхностей обычно не превышает 100 мДж/м². К числу таких поверхностей относятся органические полимеры: фторопласты, полиолефины, полиамиды, поливинилхлориды, поливинилацетаты и др. Полимеры имеют низкие значения поверхностного натяжения, а самое низкое, равное 10,6 мДж/м², обнаружено у полиметилметакрилата. Можно искусственно снизить величину критического поверхностного натяжения путем адсорбции на твердых поверхностях различных веществ. Известны случаи, когда поверхностное натяжение в результате адсорбционных процессов снижается до 6 мДж/м². По такой модифицированной поверхности могут растекаться только сжиженные инертные газы, а все остальные жидкости не растекаются.

Поверхностное натяжение высокоэнергетических поверхностей превышает 100 мДж/м² и может достигать нескольких тысяч миллиджоулей на квадратный метр. Подобное значение поверхностного натяжения $\sigma_{\text{тг}}$ (см. рис. 7) и обуславливает растекание жидкости в пленку.

Поверхностное натяжение высокоэнергетических поверхностей нельзя вычислить из условий смачивания. Его определяют другими методами. К высокоэнергетиче-

ским относятся поверхности металлов и некоторых их окислов, рубина, кварца, алмаза и других веществ.

Классификация поверхностей по их энергетической способности позволяет более обоснованно подойти к выбору антиадгезионных материалов, в том числе и для сковороды, на которой можно было бы жарить без масла.

Низкоэнергетические материалы обладают антиадгезионными свойствами. Эти свойства проявляются в отношении всех видов адгезии — частиц, жидкости и пленок. В антиадгезионных свойствах можно легко убедиться, если взять типичный низкоэнергетический материал, каким является фторопласт. Капли воды на нем не удерживаются и скатываются, различные частицы не в состоянии закрепиться, а использовать этот материал в качестве прилипшей пленки не так-то просто.

Теперь еще раз вернемся к приготовлению яичницы без масла. Как мы уже говорили, для предотвращения пригорания яичницы необходимо, чтобы материал обладал пониженной адгезией к жидкости и к твердому телу, да еще в условиях высокой температуры. Подобными свойствами обладают низкоэнергетические материалы, в частности, на основе фторопласта. Поверхностное натяжение фторопласта в зависимости от свойств технического продукта составляет 13—15 мДж/м². Поверхность фторопласта по отношению к каплям желтка и белка олеофобна, так что адгезия белка и желтка к этим поверхностям будет минимальной. Адгезия твердых тел к низкоэнергетическим поверхностям также незначительна (об этом еще раз будет рассказано ниже). Образующаяся яичница не прилипнет к сковороде из низкоэнергетического материала, и в этом случае ее можно приготовить без масла.

Заканчивая эту главу, следует подчеркнуть:

критическое поверхностное натяжение — не единственный, но важный показатель, который может качественно, а в некоторых случаях и количественно охарактеризовать адгезию;

причины, определяющие адгезию, — общие для всех видов и частные, свойственные определенным видам адгезии;

изменение адгезии осуществляется варьированием свойств поверхностей и внешних условий.

Итак, в настоящее время величину адгезии измеряют, и это столь же естественно, как, например, измерение размера и массы твердого тела. Познав причину явления ад-

гезии, его используют не вслепую. Разработаны методы и рекомендации, позволяющие управлять величиной адгезии, т. е. увеличивать или уменьшать ее в зависимости от поставленной задачи.

Исследования по адгезии, методы количественной оценки этого явления и пути управления им давно уже вышли из стен институтов и лабораторий, и их результаты стали достоянием техники и повседневной практики (см. рис. «Древо адгезии»).

Как и в любой отрасли науки, исследования по адгезии находятся в развитии. Впереди нас ожидают новые разработки и решения, позволяющие полнее познать природу адгезии и эффективнее использовать это явление в практических целях.

СЛЕДСТВИЯ АДГЕЗИИ

БУРАН

Вспомним описание бурана в произведении великого мастера слова А. С. Пушкина «Капитанская дочка»: «Ветер выл с такой свирепой выразительностью, что казался одушевленным».

В солнечный зимний день блестящий снег покрывает землю — в прозрачном воздухе ни снежинки. При снегопаде снежинки выпадают из облака, оседают и ложатся на землю. А вот во время бурана ветер как будто вырывается на свободу и в своем неистовстве готов все сорвать, сокрушить и перевести в воздух. Прежде всего и легче всего это ему удастся сделать в отношении снежинок. Огромные снежные массы поднимаются в воздух, переносятся на большие расстояния и задерживаются там, где есть препятствия или где ветер потерял свою прежнюю силу.

Необходимое условие перехода частиц в воздушную среду — значительная скорость воздуха. Препятствием к такому переходу частиц или снежинок является аутогезия.

Для рассмотрения причины отрыва частиц необходимо остановиться на элементарном акте этого процесса. На частицы со стороны воздушного потока воздействует определенная сила, вызванная скоростью ветра. Эта сила называется аэродинамической, а ее величина зависит от скорости воздушного потока v , сечения частицы S , плотности воздушного потока ρ и может быть определена по формуле

$$F_{\text{аэр}} = c_x \rho S v^2 \quad (38)$$

Коэффициент сопротивления c_x является переменной величиной — он учитывает условия обтекания воздушным потоком частиц. Чем больше размер частиц, тем значительнее их сечение S и величина аэродинамической силы.

Аэродинамическая сила действует на частицы при любой скорости воздушного потока, но осуществляет отрыв частиц при определенных условиях. Когда под действием воздушного потока, например, происходит отрыв частицы

А (рис. 28, *a*), то преодолевается адгезионное взаимодействие. В случае отрыва частицы А, которая показана на рис. 28, *б*, речь идет о нарушении аутогезии. Именно этот случай соответствует переходу снежинок в воздух во время бурана.

Условия отрыва под действием воздушного потока можно представить в различном виде:

для случая, изображенного на рис. 28, *a*,

$$F_{\text{аэр}} > F_{\text{ад}}, \quad (39)$$

для случая, который показан на рис. 28, *б*,

$$F_{\text{аэр}} > F_{\text{аут}}. \quad (40)$$

Неравенства (39) и (40) в общем виде определяют условия отрыва прилипших частиц. Они относятся не только к снежному бурану, но и к другим случаям воздействия воздушного потока на частицы.

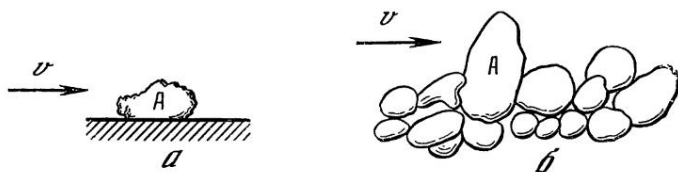


рис. 28. Действие воздушного потока в случае адгезии (*a*) и аутогезии (*б*) частиц

При помощи уравнений (38) и (39) можно определить скорость, необходимую для отрыва прилипших частиц:

$$v \geq \sqrt{F_{\text{ад}} / (S \rho c_x)}. \quad (41)$$

Скорость воздушного потока, выше которой происходит отрыв частиц, называют критической. Численное значение критической скорости зависит от силы адгезии и размеров частиц. Чем меньше силы адгезии и крупнее частицы, тем легче оторвать частицы от поверхности и тем меньше критическая скорость.

Для отрыва стеклянных шарообразных частиц соответственно диаметром 50 и 100 мкм критическая скорость должна составлять 15 и 6 м/с. Для частиц диаметром 7 мкм критическая скорость должна составлять 150 м/с, т. е. 540 км/час — величина довольно значительная. Подобная скорость ветра в природе свойственна лишь тропическим тайфунам или ураганам Антарктиды.

Когда происходит отрыв грунта или снежинок (см. рис. 28, б), то в условие (41) вместо силы адгезии необходимо подставить силу аутогезии $F_{\text{аут}}$. Критическая скорость определяет отрыв частиц или снежинок и перевод их в воздушную среду.

Ветер подхватывает оторванные частицы и сообщает им определенную скорость. Одновременно воздушный поток создает подъемную силу, которая противодействует весу частиц и не позволяет им осесть.

Ветер, наконец, стихает, и буря прекращается. Воздушный поток уже не в состоянии удержать частицы или снежинки во взвешенном состоянии. Они оседают и касаются поверхности земли. В результате возникает аутогезионное взаимодействие, и частицы закрепляются.

Условия закрепления частиц, осевших из воздушного потока, противоположны условиям их отрыва (39) и (40), а именно:

$$F_{\text{аут}} > F_{\text{отр}}, \quad (42) \quad F_{\text{ад}} > F_{\text{отр}}, \quad (43)$$

Сила адгезии или аутогезии превышает силу отрыва, которая реализуется под действием воздушного потока.

Рассмотренный выше механизм отрыва прилипших частиц и их адгезии (аутогезии) после оседания из воздушного потока является основой многих атмосферных и производственных процессов. Подобные процессы имеют место во время пыльных бурь, ветровой эрозии, в условиях пневмотранспорта — во всех случаях, когда воздушный поток воздействует на массы грунта или сыпучего материала.

Адгезионный отрыв прилипших частиц (рис 28, а) соответствует движению воздушного потока около поверхности, например около крыш домов, асфальтированных шоссе и в воздуховоде. Воздушный поток действует непосредственно на частицы, прилипшие к поверхности.

В случае сыпучего материала или снежинок сначала воздействию подвергаются только те частицы, которые возвышаются над другими (рис. 28, б), и имеет место аутогезионный отрыв частиц.

При значительной скорости ветра может происходить отрыв не отдельных частиц, а целой массы частиц. Причем эта масса достигает значительных размеров. В результате бурана с ровной местности сдувается снежный покров. При ветровой эрозии с поверхности почвы может удалиться верхний слой глубиной до 10 см.

Какие же методы борьбы можно предложить против ветровой эрозии? Принципиальный подход к оценке мероприятий по защите от ветровой эрозии заложен в соотношении (42). Для предотвращения отрыва частиц необходимо, чтобы сила аутогезии превышала силу отрыва. Этого можно достигнуть снижением величины силы отрыва либо увеличением силы аутогезии.

То и другое применяется на практике. Уменьшить силу отрыва частиц воздушным потоком можно путем погашения или снижения его скорости. Для этой цели, например, на открытой местности, около железнодорожных путей устанавливаются заграждения, заборы и другие препятствия. Эти препятствия не только задерживают частички, но и укрощают ветер. Снижается скорость ветра, и в какой-то степени уменьшается последующее его воздействие. Полезащитные полосы и лесонасаждения являются своеобразным заслоном для пыльных бурь и методом борьбы с ветровой эрозией. Они воспринимают ветровую нагрузку и ослабляют действие ветра на частицы грунта. Усиление аутогезии между частицами грунта — другая действенная мера борьбы с ветровой эрозией. Мощным средством усиления аутогезии является корневая система растений. Корни пронизывают слой грунта и образуют своеобразный каркас, связывающий частицы грунта.

Пыльные бури и ветровая эрозия особенно опасны весной и осенью. В этот период отсутствует или еще не сформировалась корневая система растений, которая была бы в состоянии противодействовать ветру.

Движение относительно. Поэтому движение воздушных масс у поверхности сыпучего материала может возникнуть в результате движения воздушного потока или перемещения самого материала. Подобная ситуация возникает при транспортировании сыпучих материалов (руды, грунта, песка, угля и др.) на открытых железнодорожных платформах. Скорость движения товарного состава может достигать 60 км/час, или около 17 м/с. Эта же скорость соответствует движению воздуха у поверхности сыпучего материала. Поэтому неудивительно, что иногда за железнодорожным составом образуется своеобразный шлейф. Этот шлейф состоит из частиц сыпучего материала, сдуваемых с верхних слоев встречным потоком воздуха. Подобный процесс крайне нежелателен. Он приводит к потере ценного сырья при транспортировании. Поэтому для предотвращения потерь принимают ряд мер. Одна из них за-

ключается в усилении аутогезии между частицами сыпучего материала, находящимися в верхних слоях.

Приведенные сведения позволяют продолжить знакомство со сферой применения адгезии: *адгезия определяет условия отрыва частиц воздушным потоком в различных атмосферных и производственных процессах.*

ПЫЛЬ СТОЛБОМ И ЖЕЛТЫЕ ДОЖДИ

При движении воздушного потока можно наблюдать два противоположных процесса: отрыв прилипших частиц, оседание и осаждение частиц на различные поверхности из запыленного потока.

В первом случае частицы в результате адгезии или аутогезии закреплены на поверхности или на слое подобных частиц (см. рис. 28). Воздушный поток, противодействуя адгезии или аутогезии, захватывает эти частицы и заставляя их перемещаться. Во втором случае (рис. 29, 30), когда частицы находятся в потоке, возможно их оседание и осаждение. Оседание — это движение частиц к земле под действием гравитации. Осаждение связано с контактом частиц на препятствиях, которые находятся на пути воздушного потока. Осаждение характерно для частиц, которые двигаются совместно с воздушным потоком. В результате оседания и осаждения частицы приближаются к поверхности, контактируют с ней и под действием сил адгезии или аутогезии закрепляются на различных поверхностях.

Рассмотрим более подробно процесс оседания, который характерен для частиц, находящихся в воздухе. Даже в обычном жилом помещении в 1 см^3 воздуха может находиться от 100 до 500 мелких частичек, не видимых невооруженным глазом. В воздухе около промышленных предприятий максимальное число частичек может достигать 20 000 в 1 см^3 . Подобная концентрация частиц отвечает весьма высокой степени запыленности промышленных предприятий и встречается сравнительно редко. Концентрация табачного дыма, средний диаметр частиц которого равен 0,2 мкм, около курильщика составляет несколько тысяч частичек в 1 см^3 .

Частицы, находящиеся в воздухе, могут двигаться совместно с воздушным потоком (рис. 29, частица 1). Вертикальная составляющая скорости воздушного потока, направленная от поверхности Земли (v_v), определяет удержа-

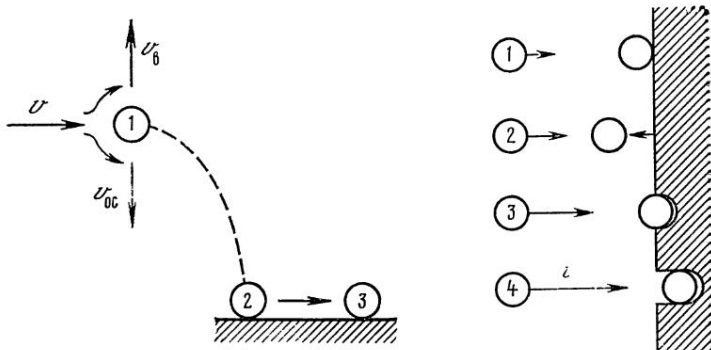


Рис. 29. Оседание частиц, находящихся в потоке

v — скорость потока; v_b , v_{oc} — противоположно направленные вертикальные составляющие, вызванные воздушным потоком и гравитационной силой соответственно. Положение частиц: 1 — в потоке; 2 — после контакта с поверхностью; 3 — в результате адгезии

Рис. 30. Осаждение частиц на препятствие в зависимости от скорости

Направление скорости показано стрелками. 1 — адгезия частицы; 2 — отскок; 3 — частичное внедрение; 4 — полное внедрение частицы

ние этих частиц в потоке. Под действием силы тяжести частицы оседают. Если скорость таких частиц (v_{oc}) превышает v_b , то происходит их оседание. В спокойной атмосфере, при отсутствии движения воздуха, действие вертикальной составляющей v_b исключается и оседание частиц идет интенсивнее. После оседания и контакта частицы с поверхностью (рис. 29, частица 2) может продолжаться ее движение по инерции, а затем частица в результате адгезии закрепляется на поверхности (частица 3).

Число осевших частиц может быть значительным. Так, средняя величина пылевого осадка в городе Бирменгеме (Англия) составляет 450 т/км^2 в год, т. е. ежегодно 450 г на 1 м^2 . Возле тепловых электростанций, угольных карьеров, цементных заводов и других промышленных предприятий пылевые осадки могут составлять в год $4000\text{--}5000 \text{ т/км}^2$, или $4\text{--}5 \text{ кг/м}^2$.

Частицы оседают на грунт, полотно дороги, здания, растения — словом, на все предметы, покрывая все вокруг слоями различной толщины. После оседания в результате адгезии частицы закрепляются. Вблизи многих цементных заводов до сих пор можно наблюдать белесые крыши зданий, строения, заборы и даже растения, покры-

тые слоем прилипшей цементной пыли. Это обстоятельство еще раз подчеркивает своевременность мероприятий по охране окружающей среды, связанных с уменьшением запыленности воздуха.

Когда в воздухе находится особенно много частиц, то говорят, что «пыль стоит столбом». Подобная ситуация имеет место при движении автомобиля, повозки или всадника по проселочной дороге в сухую погоду. За движущейся машиной пыль действительно поднимается столбом, но через некоторое время она оседает. В данном случае частицы пыли поднимаются на небольшую высоту. Скорость оседания подобных, относительно крупных частиц (размером десятки микрометров) сравнительно велика и составляет десятки сантиметров в секунду; поэтому столб пыли рассеивается в течение нескольких минут.

Пыльный столб вновь и вновь возникает после каждой машины. Аутогезия между частицами не в состоянии противодействовать колесам машин. Необходимо усилить аутогезию и предотвратить возможность образования столба пыли. Такая возможность осуществляется искусственно — поливкой и естественным путем, когда идет дождь. Между частицами образуются капиллярные мостики (см. рис. 24), которые связывают их между собой и усиливают аутогезию.

Скорость оседания мелких частиц, размер которых составляет несколько микрометров и даже меньше, незначительна. Она составляет доли сантиметра в минуту. Такие частицы могут продолжительное время находиться в воздухе во взвешенном состоянии и распространяться на значительное расстояние. Ускорить оседание таких частиц помогает сама природа.

В знаменитом стихотворении военных лет К. Симонова «Жди меня» есть такие слова: «Жди, когда наводят грусть желтые дожди...». Что это за «желтые дожди» — поэтический образ или фантазия поэта? Нет, желтые дожди — это реальное явление природы. Капли подобного дождя содержат частицы грунта, в том числе и глинистые частицы. Именно глина придает каплям желтый цвет. Возможно несколько причин попадания глинистых частиц в капли дождя. Одна из них обусловлена адгезией. Капли дождя имеют довольно значительный размер, а скорость оседания их составляет единицы или доли метров в секунду. В процессе оседания капли захватывают мелкие частицы и вместе с ними продолжают движение. Помогает захвату мел-

ких частиц адгезия. Адгезия каплеь воды к частицам грунта и смачивание этих частиц создают необходимые предпосылки для проникновения частиц в капли дождя.

Природа подсказала и методы борьбы с запыленностью воздуха. Путем искусственного орошения водой проводят очистку воздуха от взвешенных частиц. Этот процесс, получивший название «пылеподавление», широко используется в горнорудной промышленности и на некоторых производствах. Для лучшего смачивания и захвата частиц водой применяют добавки, в частности поверхностно-активные вещества.

Теперь разберем осаждение частиц на препятствия, находящиеся в потоке (см. рис. 30). Эти препятствия могут быть в виде пластин, сфер, цилиндров и т. д. Частицы, находящиеся в воздушном потоке, при изменении его направления продолжают движение по инерции. Плотность материала частиц значительно выше плотности воздуха. Кинетическая энергия частицы превосходит кинетическую энергию воздушной среды равновеликого объема. Поэтому изменение направления воздушного потока около препятствия не означает, что частицы последуют за потоком.

Помимо инерции существуют и другие причины, заставляющие частицы двигаться к твердой поверхности и соприкасаться с ней.

Адгезия частиц и их закрепление на поверхности зависят от скорости, которую имеют частицы в период соприкосновения с поверхностью, и направления движения частиц по отношению к той поверхности, на которой они осаждаются. Для простоты рассуждения на рис. 30 показано осаждение частиц, когда они двигаются перпендикулярно к поверхности препятствия. Соприкосновение происходит с определенной скоростью, которая влияет на дальнейшую судьбу частиц. Эта судьба может быть различной. При незначительной скорости частицы после соприкосновения с поверхностью и в результате адгезии закрепляются на ней. Осаждение и адгезия частиц схематически показаны на рис. 30. Когда частицы движутся к поверхности под определенным углом, адгезии может предшествовать перемещение частицы по самой поверхности. Подобное перемещение частицы по поверхности показано на рис. 29. В остальных случаях осаждения частиц, представленных на рис. 30, адгезия оказывает влияние на закрепление частиц лишь косвенно. Адгезия непосредственно определяет только осаждение частицы 1.

Увеличение скорости приводит к упругому отскоку, что характерно для частицы 2. Скорость, при которой наблюдается упругий отскок, зависит от свойств материала частицы и поверхности. Так, отскок шарообразных стеклянных частиц от стальной поверхности имеет место в диапазоне скоростей 7—15 м/с.

При дальнейшем росте скорости происходит внедрение частиц в материал препятствия. Внедрение может быть частичным или полным. Оно может сопровождаться деформацией и распадом самих частиц. Характерные случаи внедрения для частиц 3 и 4 показаны на рис. 30. Внедрение стеклянных шарообразных частиц в стальную поверхность начинается при скорости свыше 100 м/с.

Внедрение частиц в материал происходит на определенную глубину, зависящую от твердости материала поверхности. Так, в дуралюмин внедрение частиц происходит на большую глубину, чем в стальную поверхность. Полное внедрение частиц наблюдается при значительных скоростях частиц. В дуралюмин полное внедрение стеклянных шарообразных частиц диаметром менее 50 мкм происходит при скорости потока около 500 м/с.

Механизм взаимодействия частиц в процессе осаждения имеет большое практическое значение. При фильтрации, например, скорость частиц должна быть такова, чтобы предотвратить возможность отскока и осуществить их закрепление. Поэтому желательно осуществлять фильтрацию при относительно небольших скоростях.

Скорость самолета и тем более космических аппаратов значительна — она превышает скорость внедрения частиц. Внедрение частиц в поверхность в подобных случаях является крайне нежелательным, учитывая присутствие в Космосе частиц метеоритов. Приходится принимать специальные меры, предупреждающие возможность внедрения частиц. Эти меры сводятся к созданию условий обтекания поверхности, исключающих прямой контакт частиц с поверхностью. Если предотвратить контакт невозможно, то стремятся реализовать соприкосновение частиц с поверхностью под небольшим углом, что позволяет резко снизить глубину внедрения. Кроме того, путем подбора материала поверхности можно противодействовать процессу внедрения.

Известно, что занавеси, расположенные около радиаторов центрального отопления, запыляются в большей степени, чем другие предметы. Они являются своеобразным

магнитом, к которому притягиваются и прилипают мелкие частицы, находящиеся в воздухе. Что же заставляет мелкие частицы, взвешенные в воздухе, двигаться в определенном направлении? Движение подобных частиц вызвано особым явлением, называемым термофорезом*.

Причина термофореза заключается в различном воздействии воздуха на частицу. На поверхность частицы, обращенную к нагретым предметам, воздействуют молекулы нагретого воздуха, имеющие большую кинетическую энергию. В результате частицы получают дополнительный импульс и начинают двигаться от более нагретых предметов к относительно холодным, т. е. в направлении перепада температуры.

Осаждение и адгезия частиц происходят на холодных предметах, расположенных вблизи нагретых. Гардины, шторы и занавески являются холодными предметами, расположенными вблизи источника тепла — батареей центрального отопления. По этой же причине происходит значительное запыление деталей телевизоров, которые находятся рядом с лампами, являющимися источниками тепла.

Заметим, что сами источники тепла имеют неодинаковую степень нагрева различных поверхностей, что может служить источником возникновения термофореза и запыления этих поверхностей.

Термофорез является причиной осаждения сажи и золы в дымоходах и газоходах. Частицы, которые образуются в печах и топках после сгорания топлива, должны без препятствий двигаться совместно с потоком воздуха или газа. Однако значительная часть этих частиц осаждается на ровных стенках. Стенки более холодные по сравнению с нагретыми частицами и потоком, в котором они находятся. Поэтому частицы под действием термофореза двигаются к стенкам и прилипают к ним. Прилипший слой в дальнейшем может превращаться в монолит, забивать дымоходы и ухудшать тягу. Печное отопление в домах в настоящее время — редкость, а профессия трубочиста стала экзотической. А вот в промышленных условиях борьба с прилипшим слоем сажи и золы является необходимым и довольно сложным мероприятием.

Термофорез, согласно гипотезе О. Ю. Шмидта, явля-

* Как и в случае диффузии (см. с. 91), термофорез может сопровождаться конвекцией за счет неравномерно нагретого и неоднородного по плотности воздуха.

ется одной из причин образования планет. Перемещение и концентрация частиц в гигантских пылевых облаках происходили вследствие неодинаковой температуры во Вселенной. В результате концентрации миллиардов частиц и взаимодействия между ними образовывались планеты.

Продолжая начатое знакомство со сферой применения адгезии, запишем: *контакт частиц с поверхностью возникает в результате оседания частиц из воздуха, их осажде- ния из воздушного потока на препятствия или под дейст- вием термофореза.*

ПОЧЕМУ СГОРАЕТ СПУТНИК?

В заключительной стадии орбитального полета спутник обычно входит в плотные слои атмосферы и сгорает. Космические аппараты, предназначенные для посадки, предвари- тельно сбрасывают орбитальную скорость, но и они об- горают. Последствия сгорания наружной обшивки спус- каемого аппарата с космонавтами можно наблюдать при помощи телевидения: когда телекамера показывает спус- каемый аппарат крупным планом, то на нем ясно видны следы пожара — обгорелые и обуглившиеся участки.

Так почему же сгорают спутники и внешняя обшивка спускаемых аппаратов? А главное — какое отношение к этому имеет адгезия? Разберемся в этих довольно сложных вопросах.

Около поверхности тела, движущегося относительно воздуха, имеется слой, в котором скорость воздуха изме- няется от нуля до скорости воздушного потока, или ско- рости движения спутника в нашем примере; его называют пограничным слоем. Схематически пограничный слой по- казан на рис. 31. Толщина пограничного слоя незначи- тельна. Она зависит от скорости потока и может составлять величину от миллиметров до микрометров или даже долей микрометров.

Скорость воздушного потока на внешней границе по- граничного слоя обозначим через v . Для спутника она пре- вышает 8 км/с. В пограничном слое происходит резкое снижение скорости воздушного потока от v до нуля. Это снижение осуществляется за счет трения воздуха о поверх- ность.

В условиях космического полета, когда атмосфера раз- режена, величина трения незначительна. При входе в плотные слои атмосферы за счет резкого увеличения тре-

ния происходит торможение скорости воздушного потока. Следствием увеличения трения воздуха о поверхность спутника является значительный нагрев этой поверхности. Нагрев вызывает пожар, в результате которого спутник может сгореть. Необитаемый спутник, выполнив свою задачу по исследованию Космоса, дальнейшей ценности

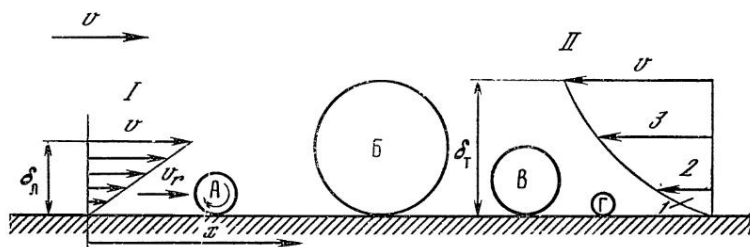


Рис. 31. Схема действия воздушного потока на прилипшие частицы и структура пограничного слоя

I — ламинарный поток; *II* — турбулентный поток. Составляющие турбулентного пограничного слоя: *1* — ламинарный подслой; *2* — буферный подслой; *3* — турбулентное ядро. А, Б, В, Г — положение частиц различного размера

не представляет. Поэтому большинство запускаемых в настоящее время спутников сгорает.

Другое дело, когда речь идет о спускаемом аппарате с космонавтами на борту. Этот аппарат имеет специальную обшивку из тугоплавкого изоляционного материала. Она воспринимает на себя тепловую нагрузку и частично сгорает, сохраняя спускаемый аппарат.

Загорание спутника и обшивки спускаемого аппарата связано со структурой пограничного слоя. Можно без преувеличения сказать, что развитие авиационной техники и космонавтики было бы невозможно без учета особенностей пограничного слоя. В числе основоположников учения о пограничном слое были такие корифеи отечественной науки, как Н. Е. Жуковский и М. В. Келдыш.

Пограничный слой оказывает существенное влияние на отрыв прилипших частиц и осаждение частиц из воздушного потока.

Рассмотрим действие воздушного потока, имеющего скорость v , на частицы, когда они взвешены в потоке и прилипли к поверхности. Частица, взвешенная в воздухе (см. рис. 29, частица 1), испытывает воздействие одной и

той же скорости потока, равной v . Прилипшие частицы (см. рис. 31, частица А) находятся в пограничном слое. Скорость потока в этом слое изменяется от нуля на поверхности до определенного значения и неодинакова по высоте частицы. Эпюра скорости показана на рис. 31.

Итак, первая особенность отрыва прилипших частиц заключается в нахождении этих частиц в пограничном слое, где скорость потока изменяется от нуля до v .

Аэродинамическая сила в соответствии с формулой (38) определяется скоростью воздушного потока, которая в пограничном слое является переменной величиной.

Часто для определения аэродинамической силы принимают скорость потока на высоте радиуса прилипшей частицы. Эта скорость в отношении частицы А на рис. 31 обозначена через v_r . Скорость v_r и условия отрыва частиц зависят от размера частиц и структуры пограничного слоя. Скорость v_r измерить трудно. Поэтому ее связывают со скоростью воздушного потока v . В зависимости от скорости v пограничный слой может быть ламинарным или турбулентным.

Ламинарный пограничный слой (см. рис. 31, I) характеризуется линейным распределением скорости в нем: от нуля на твердой поверхности до v на границе слоя с воздушным потоком. Прилипшие частицы могут быть утоплены в пограничном слое, когда их диаметр меньше его толщины δ_l . Этот случай соответствует частице А. Диаметр частицы Б больше толщины ламинарного пограничного слоя. Часть этой частицы выступает за его пределы.

При увеличении скорости воздушного потока ламинарный пограничный слой переходит в турбулентный. Схематически возможная трехмерная структура турбулентного пограничного слоя представлена на рис. 31, II. В турбулентном пограничном слое имеется ламинарный подслой 1, примыкающий непосредственно к поверхности. В этом подслое имеет место линейное распределение скорости. Между ламинарным подслоем 1 и турбулентным ядром 3 лежит буферный подслой 2.

Условия отрыва прилипших частиц зависят от соотношения между диаметром частиц и размерами элементов турбулентного пограничного слоя. Диаметр относительно мелких частиц может быть меньше или равен толщине ламинарного подслоя. Это характерно для частицы Г. В этом случае на прилипшие частицы действует ламинарный поток. Положение частицы В соответствует толщине лами-

нарного и буферного подслоев. На прилипшую частицу оказывает одновременное действие ламинарный и турбулентный потоки. Если толщина турбулентного пограничного слоя δ_t соизмерима с размерами частиц (частица Б), то речь идет о преимущественном воздействии турбулентного потока на частицы.

Для определения скорости потока v , обуславливающей отрыв прилипших частиц, необходимо знать структуру пограничного слоя и распределение скорости в нем.

Не составляет труда найти условия отрыва частиц при ламинарном режиме обтекания, когда реализуются сравнительно небольшие скорости воздушного потока и имеет место линейное распределение скорости в пограничном слое. Толщина ламинарного пограничного слоя при обтекании плоской пластины воздушным потоком со скоростью 5—10 м/с колеблется в пределах 1,5—2 мм, т. е. значительно больше размеров частиц. Поэтому прилипшие частицы будут утоплены в пограничном слое. При турбулентном режиме обтекания проще определить условия отрыва частиц, находящихся в ламинарном подслое. Толщина ламинарного подслоя значительно меньше толщины ламинарного слоя. При скорости потока над пластинкой 150—500 м/с толщина ламинарного подслоя колеблется в пределах от 8,9 до 2,5 мкм. Толщина ламинарного подслоя при турбулентном режиме обтекания соизмерима с размерами относительно небольших частиц.

Отрыв прилипших частиц осуществляется за некоторый промежуток времени. Под воздействием воздушного потока первоначально происходит сдвиг или качение частиц, а затем частицы подхватываются воздушным потоком. Для сферических частиц характерным является качение. На рис. 31 для частицы А качение показано стрелкой. С учетом структуры пограничного слоя величина скорости по высоте частицы неодинакова. В верхней части она принимает максимальное значение. Это обуславливает возникновение момента сил относительно точки контакта. Он и обеспечивает качение сферических частиц. Качение пластинчатых частиц затруднено. Первоначально происходит сдвиг этих частиц. Затем они скользят по поверхности и только после этого переходят в воздушный поток.

На поверхности может находиться много частиц. После отрыва отдельных частиц в процессе скольжения они могут столкнуться с другими частицами, сдвигая их, а сами прекращают движение. Шероховатость поверхности и на-

хождение частиц в массе себе подобных (см. рис. 28, б) оказывают влияние на процесс отрыва частиц. Какие бы случаи ни реализовались на практике, всегда сначала происходит сдвиг или качение частиц, а затем уже удаление их воздушным потоком.

Пограничный слой определяет не только отрыв прилипших частиц, но и условия осаждения и оседания их из воздушного потока. Механизм оседания частиц из потока показан на рис. 29. Первоначально частицы касаются поверхности, а затем двигаются по инерции. Скорость воздуха в пограничном слое недостаточна для уноса частиц. В результате трения скорость движения частиц гасится, частицы останавливаются и закрепляются на поверхности.

Элементарные акты процесса отрыва прилипших частиц (см. рис. 31) и их закрепление на поверхности (см. рис. 29, 30) с учетом структуры пограничного слоя являются основой всех процессов, которые связаны с адгезией частиц в воздушном потоке. К их числу относятся ветровая эрозия, пыльные бури, фильтрация, транспортировка сыпучих материалов и все другие случаи движения запыленного воздуха.

Для полноты сведений о сфере применения адгезии после слов «отрыв частиц воздушным потоком» следует добавить — *с учетом структуры пограничного слоя.*

БЕРЕГ ЛЕВЫЙ — БЕРЕГ ПРАВЫЙ

«Переправа, переправа: берег левый — берег правый». Вряд ли кто не знает этих знаменитых слов А. Твардовского из поэмы «Василий Теркин».

В самом деле берег левый—берег правый — это не только указатель направления течения реки, но и особая характеристика каждого берега.

Совершая прогулки на пароходе, невольно обращаешь внимание на особенности берегов. Правый берег рек нашей страны, которые текут на юг, или левый берег рек, текущих на север, обычно обрывистый, а противоположный — пологий. На правом, обрывистом, берегу красавицы Волги расположены города Горький, Саратов, Волгоград. На левом берегу против этих городов преимущественно находятся пологие участки, создающие благоприятные условия для пляжей, пансионатов и других мест отдыха.



Рис. 32. Река (а) и схема ее течения (б)

Изменение берегов рек происходит при непосредственном участии и при помощи аутогезии. Вода в реке течет, т. е. движется, с определенной скоростью. Водный поток оказывает воздействие на частицы аналогично воздушному потоку. Схемы, приведенные на рис. 28, 29, 30 (частица 1) и 31, справедливы в случае осаждения и отрыва частиц в условиях водного потока. Соотношения (38) и (40) можно применить и к водному потоку.

Почему все же один из берегов реки круче? Обратимся к рис. 32, где схематически представлен вид реки сверху. Средняя скорость водного потока по его оси показана стрелкой. При изгибе русла реки вода течет по инерции. Кроме того, добавляется еще так называемая сила Кориолиса, которая вызывает кориолисово ускорение. Сила Кориолиса — это сила инерции, возникающая в результате вращения системы относительно движущейся среды. Она проявляется в отклонении движущейся среды в направлении, перпендикулярном оси движения. Вращающейся системой является Земля, а движущейся средой — река. Суточное вращение Земли приводит к тому, что за счет кориолисова ускорения, которое на рис. 32 показано пунктиром, происходит увеличение скорости водного потока у правого берега рек, текущих в северном полушарии в меридиональном направлении на юг.

Вода движется к правому берегу с относительно большей скоростью. Величина этой скорости оказывается достаточной для отрыва частиц, формирующих берег реки. Подобный процесс происходит систематически изо дня в день. В результате правый берег размывается, становится круче, а дно реки углубляется. После отрыва частицы подхватываются потоком, переносятся им до тех пор, пока скорость реки не в состоянии обеспечить их взвешенное положение. Частицы оседают, река мелеет, и образуется пологий берег. Снижение скорости потока происходит у левого берега, что обуславливает оседание и осаждение частиц.

Изменения берегов и дна реки под действием водного потока называют русловыми процессами. В основе этих процессов лежат те же элементарные акты, которые были рассмотрены ранее относительно воздушного потока. Образование крутого берега и углубление дна реки обязаны отрыву частиц, механизм которого представлен на рис. 28, б и 31. Создание пологого берега и обмеление реки связаны с оседанием частиц из потока, что изображено на рис. 29.

Соотношения (40) и (42), характеризующие отрыв частиц и условия их закрепления, полностью приемлемы для русловых процессов. Отрыв частиц, их оседание, осаждение и положение на поверхности, так же как и в воздушной среде, неразрывно связаны со структурой пограничного слоя. В данном случае речь идет о пограничном слое, формирующемся водным потоком у дна реки.

Отрыв частиц водным потоком аналогичен действию воздушного потока. В воздушной среде, однако, необходимая скорость отрыва частиц составляет десятки и даже сотни метров в секунду, а в водной среде она не превышает 2 м/с. Подобное снижение скорости отрыва объясняется уменьшением силы аутогезии и адгезии в воде по сравнению с воздухом и большей плотностью воды по отношению к воздуху. Это прямо следует из соотношения (41).

Отрыв частиц грунта и перемещение их осуществляются в процессе водной эрозии. После обильного дождя образуются мощные потоки воды, которые прокладывают себе своеобразное русло. При достаточной скорости водного потока может происходить удаление верхнего, наиболее плодородного слоя грунта и перенос его на значительное расстояние. В отличие от ветровой эрозии частицы грунта остаются в воде и не переходят в воздушную среду. Однако

водная эрозия также губительна для плодородия, как и ветровая.

Отрыв водным потоком частиц загрязнений является первой стадией процесса мойки улиц, автомашин и других транспортных средств. Струйки воды подаются на обрабатываемую поверхность. На ней образуется движущийся слой воды. После отрыва частицы загрязнения совместно с этим слоем удаляются с поверхности.

В водной среде, так же как и в воздушной, отрыв частиц и их осаждение обусловлены двумя противоположными процессами: преодолением аутогезии или адгезии и возникновением аутогезионного или адгезионного взаимодействия. Сочетание этих двух противоположных процессов можно наблюдать при работе землесосных снарядов. При извлечении грунта происходит воздействие водного потока на дно реки, преодоление аутогезии частиц, перевод частиц в водный поток и перенос их совместно с потоком на определенное расстояние. В местах отвала частицы оседают и возникает аутогезионное взаимодействие. При этом имеет место размыв одной части русла или берега (преодоление аутогезии) и намыв другой (возникновение аутогезии). Землесосные снаряды широко используются для углубления и очистки дна, намыва пляжей, насыпей и дамб, а также в различных гидротехнических работах.

Отрыв частиц и их осаждение, а также возможное осаждение на препятствие происходят при определенных скоростях потока. Соотношение между скоростями отрыва прилипших частиц и их осаждения особое значение приобретает в процессе очистки воды. В обычной грунтовой и речной воде находятся различные примеси, в том числе нерастворимые и взвешенные в воде частицы. Эти частицы обуславливают мутность воды.

Очистка воды от таких примесей происходит в результате их адгезии к фильтрующему материалу или к ранее прилипшим частицам (рис. 33). Она зависит от соотношения между адгезией, аутогезией, весом частиц и гидродинамическим воздействием.

Для очистки воды можно применять фильтры, состоящие из зерен песка, мраморной крошки или антрацита диаметром 1,0—1,2 мм. Водный поток, содержащий частицы, устремляется к зернам фильтра и движется между ними (рис. 33, а). Взвешенные частицы соприкасаются с поверхностью зерен и в результате адгезии закрепляются на них.

По мере работы фильтра число прилипших частиц уве-

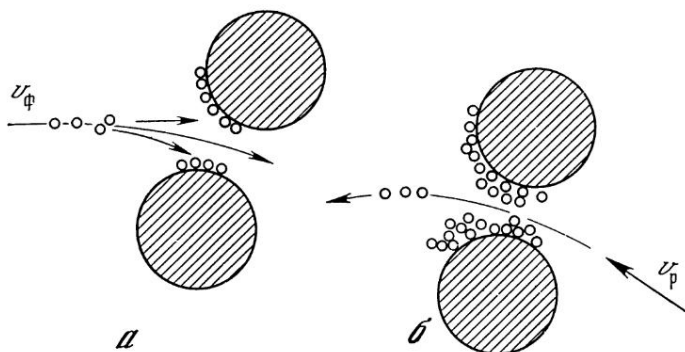


Рис. 33. Адгезия частиц при фильтрации (а) и регенерации (б)

личивается, а проходное сечение каналов между зернами снижается. Это приводит к росту сопротивления потоку и ухудшению условий очистки. Возникает необходимость регенерации фильтра. Регенерация заключается в отрыве прилипших частиц путем промывки фильтра. Скорость водного потока v_p в этом случае противоположна по направлению скорости фильтрации v_{ϕ} (рис. 33, б).

Фильтрация и регенерация зернистых фильтров — два противоположных процесса. При фильтрации возникает адгезия между частицами взвеси и материалом фильтра, а также аутогезия частиц по отношению к ранее прилипшему слою. При регенерации преодолеваются адгезия и аутогезия и происходит вынос частиц из фильтра.

Осаждение частиц и их адгезия в процессе фильтрации происходят при скорости водного потока, равной v_{ϕ} , а отрыв прилипших частиц в процессе регенерации — при скорости v_p . Осаждение и адгезия частиц осуществляются при меньшей скорости, чем отрыв частиц. Поэтому скорость фильтрации меньше скорости регенерации фильтрующих элементов, т. е. $v_{\phi} < v_p$.

В качестве примера приведем значения скоростей фильтрации и регенерации, которые для зерен фильтра из кварцевого песка, мраморной крошки и антрацита имеют приблизительно равные значения: 7 и 14 м/с соответственно. В данном случае скорость фильтрации оказывается в 2 раза меньше скорости регенерации. Вообще же соотношение скоростей фильтрации и регенерации зависит от свойств частиц, их адгезии, состава шихты фильтра и его размеров.

Продолжая начатое перечисление сфер применения адгезии, можно с полным основанием считать, что отрыв

частиц и их осаждение в условиях водного потока являются основой русловых процессов, водной эрозии, работы землесосных снарядов, мойки транспорта и фильтрации.

КИПИТ НЕ ТОЛЬКО ЖИДКОСТЬ

По телевидению демонстрируются тиражи спортлото. Отдельные шарики, находящиеся в барабане, вырываются из общей массы, подобно пузырькам при кипении воды. Создается впечатление, что слой шариков в барабане как бы «кипит». Заставляет «кипеть» шарики упругое воздействие со стороны вращающегося барабана.

Конечно, процесс «кипения» шариков не соответствует кипению жидкости. Поэтому в технике подобные процессы по отношению к более мелким частицам, нежели игровые шарики, называют псевдооживлением.

Псевдооживление широко применяют на практике. Частицы сыпучих материалов находятся во взвешенном состоянии, что обнажает всю поверхность частиц. Это обстоятельство интенсифицирует протекание адсорбции или химической реакции. Одним словом, псевдооживление резко повышает эффективность различных процессов, которые зависят от свойств поверхности частиц. Схематически процесс псевдооживления показан на рис. 34. В первоначальном положении между частицами может возникнуть аутогезия, и слой частиц образует единое целое. Под действием воздушного потока слой частиц разрыхляется, преодолевается аутогезия и частицы переходят во взвешенное состояние.

Элементарный акт псевдооживления можно пояснить при помощи схемы на рис. 34, в. Под действием воздушного потока возникает аэродинамическая сила $F_{\text{аэр}}$. Подобная сила, как было показано ранее, образуется при воздействии потока на прилипшие частицы [см. формулу (38)]. Аэродинамическая сила должна преодолеть вес частиц P и силу аутогезии между ними $F_{\text{аут}}$. Условие псевдооживления можно представить в следующем виде:

$$F_{\text{аэр}} \geq P + F_{\text{аут}}$$

Подобное условие можно связать со скоростными характеристиками следующим образом:

$$(P + F_{\text{аут}})/P \geq v_{\text{пс}}/v_{\text{ос}}, \quad (44)$$

где $v_{\text{ос}}$ — скорость оседания частиц (см. рис. 29); $v_{\text{пс}}$ — скорость, необходимая для псевдооживления.

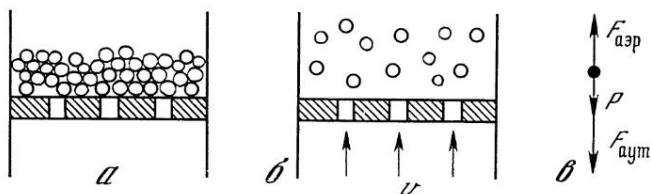


Рис. 34. Процесс псевдооживления

a — начальное положение; *б* — образование кипящего слоя; *в* — силы, действующие на частицу

Уравнение (44) позволяет определить скорость псевдооживления: она во столько раз должна быть больше скорости свободного оседания частиц, во сколько раз суммарно аутогезия и вес частиц превышают вес частиц.

Если аутогезия отсутствует, т. е. $F_{\text{аут}} = 0$, то в соответствии с уравнением (44) $v_{\text{пс}} \geq v_{\text{ос}}$. При отсутствии аутогезии скорость воздушного потока в процессе псевдооживления должна быть больше скорости свободного оседания частиц.

При значительной аутогезии для псевдооживления требуется относительно большая скорость воздушного потока. Создание подобной скорости вызывает определенные экспериментальные трудности. Кроме того, значительные скорости воздушного потока могут способствовать уносу частиц из кипящего слоя, что нежелательно.

Для псевдооживления сильно слипающихся сыпучих материалов применяют искусственные методы снижения аутогезии и повышения интенсивности кипения. К числу этих методов относится вибрация слоя частиц, подвергающегося псевдооживлению. Снижение аутогезии достигается модификацией поверхности частиц или введением добавок. Псевдооживление может осуществляться под воздействием потока жидкости. В жидкости снижается сила аутогезии, а плотность жидкости значительно больше плотности воздуха. Эти обстоятельства приводят к снижению скорости $v_{\text{пс}}$, необходимой для псевдооживления.

Воздушный поток может осуществлять пневмотранспорт сыпучего материала. Для уяснения сути пневмотранспорта и роли адгезии и аутогезии придется несколько отвлечься от изложения основного материала.

Суда на подводных крыльях уже стали обыденностью. Многочисленные «Кометы», «Ракеты», «Метеоры» бороздят

с большой скоростью водные просторы, и уже реализованы конструкции довольно крупных судов на воздушной подушке.

Несмотря на разнообразие технических решений, суть их одна — снижение сопротивления и трения при движении тел путем использования воздушной прослойки. Воздух по сравнению с водой оказывает существенно меньшее сопротивление движению тел. Это позволяет судам на подводных крыльях и с использованием воздушной подушки двигаться с большой скоростью.

Достоинство воздушной подушки широко используется при пневмотранспорте сыпучих материалов. Воздушная подушка в союзе с псевдооживлением позволяет использовать принципиально новый вид транспорта.

Пневмотранспорт сыпучих материалов осуществляется при подаче в трубопровод воздуха. Скорость воздуха должна значительно превышать величину, которая определяется условием (41). Под действием воздуха преодолевается адгезия частиц к стенкам трубопровода, аутогезия частиц друг к другу и вес частиц. Сыпучий материал переходит во взвешенное состояние. Между слоем частиц и основанием трубопровода образуется воздушная подушка. Сопротивление движению резко снижается. Воздушный поток заставляет взвешенные частицы двигаться по трубопроводу.

Пневмотранспорт позволяет осуществлять бестарный способ транспортирования сыпучих материалов. Он широко используется в народном хозяйстве. Проходят времена перевозки муки в мешках. В цистерны муковозов мука, подобно жидкости, «течет» по трубам. Подача муки в бункера из цистерн муковозов осуществляется при помощи воздуха. Отсутствие тары и упаковки освобождают от непроизводительных затрат и делают бестарный способ транспортирования экономичным и перспективным.

Итак, данные о сфере действия адгезии могут пополниться следующим содержанием: *...псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов.*

ПЕСОЧНЫЕ ЧАСЫ

Песчинки одна за другой устремляются из верхней части песочных часов через калиброванное отверстие в нижнюю их часть. Песок самопроизвольно «течет» — между песчинками отсутствует аутогезия. В противополож-

ность песчинкам частицы глины, например, связаны аутогезионным взаимодействием, и поэтому их самопроизвольное течение затруднено. Сыпучие или порошкообразные материалы способны течь. Обычно течение относят к газам или жидкостям, т. е. к сплошным средам. Течение подобных тел связано с перемещением в определенном направлении струек или массы, состоящей из одной фазы. В отличие от газов и жидкостей течение сыпучих материалов заключается в перемещении отдельных объемов или частиц друг относительно друга при сохранении границы раздела фаз между частицами.

Течение сыпучих материалов определяется соотношением между аутогезией, адгезией и трением. На рис. 35, а показаны подобные соотношения без учета веса самих частиц.

Трением называют взаимодействие, которое возникает в местах соприкосновения твердых тел и препятствует их относительному перемещению. При движении частицы по поверхности (рис. 35, а) адгезия обуславливает прижим и удержание частиц, а трение препятствует перемещению частиц относительно поверхности. Когда частицы перемещаются друг относительно друга, то трение препятствует этому перемещению, а аутогезия определяет связь между этими частицами.

Сыпучий материал состоит из множества частиц. Поэтому рассмотрим более подробно связи между адгезией, аутогезией и трением в условиях движения сыпучего материала.

На слой частиц (рис. 35, б) может действовать давление F_n . Оно вызвано массой вышележащих частиц или внешней нагрузкой. Для того чтобы заставить сыпучие материалы течь, необходимо осуществить сдвиг слоя частиц относительно твердой поверхности или другого слоя частиц. Сдвиг произойдет, если приложить внешнее воздействие, равное τ . Величина τ называется предельным напряжением сдвига и рассчитывается на единицу площади. При сдвиге преодолевается сила трения.

Для пояснения сути сдвига рассмотрим положение сыпучего материала на поверхности. При наклоне ее на определенный угол φ_t слой сыпучего материала начинает испытывать действие величины τ (рис. 36), направленной тангенциально к поверхности и определяющей сдвиг. Если масса сыпучего материала равна M в расчете на единицу площади, то величину τ при ускорении g можно определить

следующим образом:

$$\tau = Mg \sin \varphi_T. \quad (45)$$

При небольших углах наклона поверхности φ преодолеть силу трения не представляется возможным. Увеличение угла φ в соответствии с уравнением (45) обуславливает рост величины τ . Наступит такой момент, когда при определенном угле наклона φ_T трение не в состоянии противодействовать сдвигу. В этих условиях величина τ становится равной предельному напряжению сдвига, а сыпучий материал приобретает способность течь.

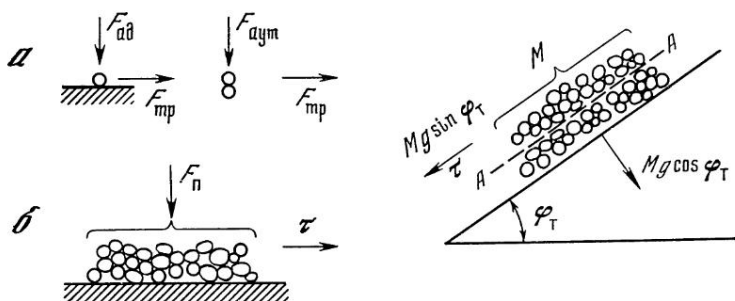


Рис. 35. Адгезия, аутогезия и трение отдельных частиц (а); внешняя нагрузка и напряжение сдвига слоя частиц (б)

Рис. 36. Сдвиг слоя сыпучего материала по наклонной поверхности

Нечто подобное происходит, например, при опорожнении пакета с сахарным песком. При наклоне пакета возникает определенное усилие τ , предельная величина которого и обуславливает сдвиг частичек сахара. При этом преодолевается трение этих частичек.

Сдвиг и течение сыпучих материалов вызываются не только наклоном поверхности. Как следует из условия (45), величина сдвига растет с ростом массы сыпучего материала. Сдвиг снега с крутых крыш определяется углом наклона этих крыш φ и массой находящегося там снега M . В определенных условиях, когда снега много и трение не в состоянии противодействовать сдвигу, происходит самопроизвольное сползание снега. Подобный процесс является причиной снежных обвалов.

Особую опасность представляют лавины. Неоднозначность сил адгезии (см. рис. 11) проявляется в том, что сна-

чала нарушаются слабые связи. Слабо прилипшие частицы, освобожденные от связи с поверхностью, увлекают за собой остальную массу снега, превращая отрыв в лавину.

Сыпучие материалы широко распространены. Это многочисленные порошки, пищевые продукты (сахар крупа, мука и т. д.), частицы грунта, измельченная руда, уголь и т. д. Перемещение и течение сыпучих материалов неразрывно связано с трением. Одним из законов трения является закон Амонтона, согласно которому сила трения прямо пропорциональна силе нормального давления.

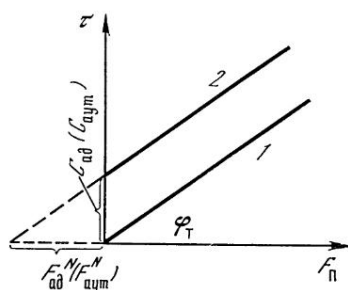


Рис. 37. Графическое выражение зависимости предельного напряжения сдвига от нормального давления согласно закону трения Амонтона (1) и двухчленного закона трения Дерыгина (2)

Под действием предельного напряжения сдвига τ преодолевается сила трения, когда нормальное давление на слой частиц равно F_n . Поэтому закон Амонтона для слоя частиц можно представить в виде

$$\tau = \mu F_n. \quad (46)$$

Коэффициент пропорциональности μ называют коэффициентом трения слоя частиц.

Адгезия и аутогезия вносят свои поправки к закону трения Амонтона. Согласно уравнению (46) зависимость между τ и F_n представляет собой линию 1 (рис. 37), которая проходит через начало координат. Опытные данные для многих сыпучих материалов показывают, что подобная закономерность не соблюдается и фактически зависимость между τ и F_n характеризуется не прямой 1, а прямой 2, которая проходит выше прямой 1.

Рассмотрим причины этого расхождения. Сдвиг сыпучего материала относительно линии AA (см. рис. 36) произойдет в том случае, когда будет преодолено сопротивление сдвигу. Помимо трения между частицами сыпучего материала возникает аутогезия. Если сыпучий материал

соприкасается с поверхностью, то на величину трения оказывает влияние адгезия.

Сила адгезии или аутогезии действует перпендикулярно площади контакта. Это действие показано на рис. 35, а. Сила адгезии прижимает частицы к поверхности и в этом смысле эквивалентна внешнему давлению. Поэтому силу адгезии и аутогезии можно рассматривать в качестве дополнительного фактора, оказывающего давление на частицы. Тогда, кроме внешнего давления, на слой частиц будет действовать дополнительная сила. Сила $F_{ад}^N$ является следствием адгезии, а сила $F_{аут}^N$ — следствием аутогезии слоя частиц.

Предельное напряжение сдвига τ и нормальное давление относят к единице площади перемещения сыпучего материала. В единицах СИ они имеют размерность Па, т. е. Н/м². Поэтому и величина $F_{ад}^N$ ($F_{аут}^N$) имеет ту же размерность.

С учетом адгезии или аутогезии трение для сыпучих материалов можно представить в следующем виде:

$$\tau = \mu (F_n + F_{ад}^N) \quad \text{или} \quad \tau = \mu (F_n + F_{аут}^N). \quad (47)$$

Суммарное нормальное давление в плоскости перемещения обусловлено внешним давлением и адгезией (аутогезией) и равно: $F_n + F_{ад}^N$, $F_n + F_{аут}^N$.

В формуле (47) в отличие от формулы (46) в правой части имеются две величины. Поэтому формула (47) характеризует так называемый двучленный закон трения, предложенный Б. В. Дерягиным.

Сыпучие материалы могут находиться в двух состояниях. Первое из них имеет место при отсутствии аутогезии, когда $F_{аут}^N = 0$. Уравнение (47) упрощается и трансформируется в обычный закон Амонтона, выражаемый уравнением (46). Подобное состояние характерно для частичек песочных часов.

Для тех сыпучих материалов, у которых аутогезия значительна, а внешнее давление отсутствует или им можно пренебречь, величина F_n равна нулю. Поэтому в соответствии с уравнением (47) получим $\tau = \mu F_{аут}^N$.

В этих условиях величину предельного напряжения сдвига называют сцеплением и обозначают через $C_{аут}$. Сцепление характеризует сдвиг при отсутствии внешнего давления, когда $F_n = 0$. Из формулы (47) следует, что

при $C_{\text{аут}} = \tau$ сцепление равно: $C_{\text{аут}} = \mu F_{\text{аут}}^N$. Сцепление характеризует прочность сыпучего материала на сдвиг. Причем эта прочность вызвана аутогезией.

Обратимся еще раз к прямой 2 на рис. 37. Она определяет зависимость величины сдвига от нормального давления, когда между частичками имеется аутогезия. Прямая отсекает на осях абсцисс и ординат отрезки. Отрезок на оси абсцисс равен прочности сыпучего материала на разрыв $F_{\text{аут}}^N$, которая вызвана аутогезией. Величина отрезка на оси ординат численно равна сцеплению $C_{\text{аут}}$.

Подобное рассуждение остается в силе при рассмотрении взаимодействия слоя частиц с поверхностью, т. е. при адгезии частиц. Тогда величины $F_{\text{ад}}$ и $C_{\text{ад}}$ будут характеризовать соответственно адгезию слоя частиц и его сцепление.

Двучленный закон трения позволяет определить условие сдвига сыпучего материала в зависимости от коэффициента трения между частицами μ , внешнего давления F_n и прочности материала $F_{\text{аут}}^N$, обусловленной аутогезией.

Сыпучие материалы, аутогезия между частицами которых фактически не оказывает влияния на их трение (рис. 37, прямая 1), а связь между сдвигом и давлением определяется законом Амонтона, называют несвязанными. К числу их, в частности, относится песок песочных часов. Связанные сыпучие материалы подчиняются двучленному закону трения Дерягина, а связь между усилием сдвига и внешним давлением характеризуется прямой 2 на рис. 37.

Величины $F_{\text{ад}}^N$ и $F_{\text{аут}}^N$ характеризуют влияние адгезии и аутогезии на связь сыпучего материала с поверхностью и прочность самого материала. Помимо адгезии и аутогезии на прочность сыпучего материала и его связь с поверхностью могут оказать влияние и другие факторы: механическое зацепление выступов контактирующих тел, деформация зоны контакта, спекание и срастание частиц и др. Если эти факторы действуют, то величины $F_{\text{ад}}^N$ и $F_{\text{аут}}^N$ перестают быть параметрами, характеризующими адгезию и аутогезию. Они в этом случае определяют прочность сыпучего материала и его связи с поверхностью.

Смысл коэффициента μ можно уяснить при рассмотрении равновесия слоя сыпучего материала на наклонной поверхности (см. рис. 36). В результате наклона поверх-

ности на угол φ_T верхний слой частиц будет двигаться относительно нижнего неподвижного слоя по линии AA . Условия сдвига определяются следующим соотношением:

$$Mg \sin \varphi_T = C_{\text{аут}} + \mu g \cos \varphi_T. \quad (48)$$

В этом равенстве M — масса слоя частиц, сползающих в результате наклона поверхности в расчете на единицу площади.

Уравнение (48) позволяет определить значение коэффициента трения. При отсутствии сцепления, когда $C_{\text{аут}} = 0$, из формулы (48) получим

$$\mu = \frac{Mg \sin \varphi_T}{Mg \cos \varphi_T} = \operatorname{tg} \varphi_T. \quad (49)$$

Согласно уравнению (49) коэффициент трения численно равен тангенсу угла наклона при сдвиге сыпучего материала. Угол наклона поверхности φ_T называют *углом трения*. Если сдвиг происходит внутри сыпучего материала, то угол трения соответствует *углу внутреннего трения*. При сдвиге слоя частиц относительно поверхности определяется *угол внешнего трения*.

Сила трения, препятствующая перемещению частиц по поверхности и особенно друг относительно друга, зависит от ряда других факторов, перечисленных выше.

При помощи двучленного закона трения можно определить состояние многочисленных сыпучих материалов. Прямая 2 на рис. 37 является своеобразным рубежом, который позволяет различать состояния сыпучих материалов. Когда точки, характеризующие зависимость между τ и F_n , находятся ниже этой линии, то сыпучий материал образует одну сплошную массу. Перемещение частиц внутри сыпучего материала не происходит. Зависимость между τ и F_n , аппроксимируемая прямой 2, соответствует началу течения сыпучего материала. Выше этой прямой всегда имеет место течение сыпучего материала.

Таким образом, зависимость, определяемая двучленным законом трения, разграничивает между собой два состояния сыпучих материалов — статическое и динамическое. Динамическое состояние — это такое состояние, когда материал течет. Начало этого процесса определяется линией 2 на рис. 37. Поэтому эту линию называют линией предела текучести сыпучего материала. Некоторые связанные сыпучие материалы, обладающие повышенной аутогезией, не подчиняются двучленному закону трения.

Для подобных материалов соотношение между сопротивлением сдвига и давлением выражается не прямой (см. рис. 37, прямая 2), а кривой линией, выпуклой кверху. Подобные кривые, полученные экспериментально, также будут являться линиями предела текучести сыпучего материала.

Статическое состояние определяет положение сыпучего материала в кузове самосвала, в бункере, в ковше экскаватора, на ленточном транспортере — во всех случаях хранения и перевозки сыпучего материала. Динамическое состояние обуславливает движение сыпучего материала в трубопроводах, его истечение из различных емкостей и все другие случаи, связанные с перемещением сыпучих материалов.

Продолжая знакомство со сферой действия адгезии, следует отметить: *трение, статическое состояние и перемещение многочисленных сыпучих материалов связаны с аутогезией и адгезией.*

СЛЕЖИВАНИЕ

Время работы автора над книгой совпало со строительством Калининского радиуса метро города Москвы. Это строительство на конечной станции радиуса велось открытым способом. Часть грунта будущей трассы складировалась в отвал, чтобы через некоторое время использовать его для засыпки сооруженного железобетонного туннеля. Пролежав в отвале более года, грунт слежался. Перед погрузкой грунта на самосвалы потребовалось его разрыхление. Для этой цели помощь обычному экскаватору оказывал копер. Слеживание — это особый процесс. Он связан с длительным нахождением сыпучих материалов в неподвижном состоянии. В результате слеживания сыпучий материал может превратиться в единый монолит.

Слеживание чаще является нежелательным процессом. Особый вред слеживание оказывает на сыпучие материалы, являющиеся продуктами химической промышленности, в частности на удобрения.

Для уяснения процесса слеживания рассмотрим более подробно смысл прочности сыпучего материала Π , о которой говорилось ранее. Эта прочность обычно дается в расчете на единицу площади контакта. Она равна прочности индивидуальных контактов между частицами $F_{\text{аут}}^{\Pi}$,

умноженной на их число в расчете на единицу поверхности N , т. е.

$$P = F_{\text{аут}}^{\text{п}} N. \quad (50)$$

Прочность индивидуальных контактов зависит от силы аутогезии между частицами, т. е. от $F_{\text{аут}}$. Так же как и для сил адгезии частиц (см. рис. 11), имеет место разброс значений сил аутогезии, даже для частиц одного и того же размера. Кроме того, на прочность индивидуальных контактов оказывают влияние неровности соприкасающихся поверхностей, механическое зацепление, деформация и изменение площади контакта, срастание и спекание частиц и другие факторы.

При слеживании одновременно происходят два процесса. Первый из них связан с более плотной упаковкой частиц, что приводит к росту числа контактов N . Вторым обусловлен увеличением аутогезии и прочности индивидуальных контактов $F_{\text{аут}}^{\text{п}}$ за счет увеличения связи между частицами и площади контакта. После засыпки готового туннеля метро первоначальный уровень грунта в результате слеживания снизился, что потребовало досыпки грунта и трамбовки. Сыпучий материал обычно имеет пустоты, образующиеся между частицами. С течением времени под действием массы вышележащего грунта и по другим причинам происходит заполнение этих пустот. Интенсифицировать процесс можно путем дополнительного внешнего давления. Для этого используются катки, подобные тем, которые применяют для асфальтирования улиц.

Процесс слеживания можно представить при помощи схемы, приведенной на рис. 38. До слеживания взаимодействие между частицами и число контактов по линии AA были равны соответственно $(F_{\text{аут}}^{\text{п}})'$ и N' . В процессе слеживания мелкие частицы проникают между крупными (рис. 38, б), что приводит к росту числа контактов. После слеживания это число равно N'' . Одновременно растет площадь контакта между частицами, сила аутогезии и прочность контактов, которая после слеживания становится равной $(F_{\text{аут}}^{\text{п}})''$ и превышает эту величину до слеживания, т. е. $(F_{\text{аут}}^{\text{п}})'' > (F_{\text{аут}}^{\text{п}})'$.

Одновременный рост прочности индивидуальных контактов и числа контактов в соответствии с формулой (50) обуславливает повышение прочности сыпучего материала в целом. Следствием увеличения прочности является по-

теря подвижности и образование монолита из массы сыпучих материалов.

Все сыпучие материалы в той или иной мере подвергаются слеживанию. Сыпучих материалов очень много. Они отличаются друг от друга формой, размером и природой частиц. Поэтому причин слеживания может быть несколько.

Прежде всего, на слеживание влияет давление. Как уже отмечалось, оно может быть вызвано массой выше-

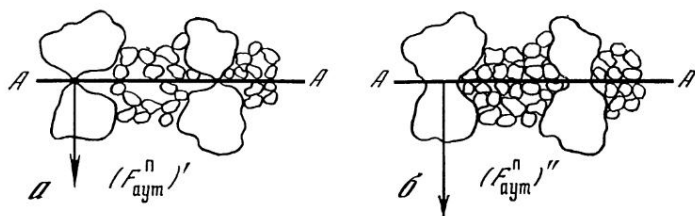


Рис. 38. Сыпучий материал до (а) и после (б) слеживания

лежащего слоя сыпучего материала или какими-либо внешними причинами. Давление на нижние слои сыпучих материалов создается при перевозках железнодорожным, автомобильным и водным транспортом. Кроме того, в процессе перевозки имеет место вибрация вагона или кузова, крен судна, воздействие ветровой нагрузки и другие процессы. В результате этого слеживание ускоряется и может произойти за меньшее время, чем продолжительность перевозки. Поэтому транспортируемый сыпучий материал может перед выгрузкой превратиться в монолит, что вызывает дополнительные трудности.

Нижние слои сыпучих материалов испытывают большее давление по сравнению с верхними. В связи с этим часто слеживание начинается с нижних слоев. Давление верхних слоев сыпучего материала на слои, находящиеся внизу, эквивалентно внешнему уплотняющему давлению. На практике, однако, наблюдается слеживание не только нижних, но и верхних слоев сыпучего материала. Поэтому давление не является единственной причиной слеживания.

На процесс слеживания оказывает влияние влага. Она определяется не только влажностью материала, но и может попадать с атмосферными осадками или образуется после конденсации паров. В этом случае слеживание под действием влаги начинается с верхних, а не с нижних слоев.

Именно влага определяет слеживание соли и сахара. Сахар жадно поглощает влагу, под действием которой происходит растворение части поверхности сахаринок. Растворенное вещество может выпасть в зоне контакта частиц между собой в виде кристаллов. Они образуют своеобразный кристаллизационный мостик между частицами, в данном случае между частицами сахара. В результате действия кристаллизационных мостиков наблюдается резкий рост прочности индивидуальных контактов $F_{\text{аут}}^{\text{п}}$ и сыпучего материала в целом, что соответствует условию (50).

Не все сыпучие материалы слеживаются под действием влаги. При насыщении водой песка, например, слеживание не происходит, так как песок в воде практически не растворяется. Такие сыпучие материалы, как гипс, цемент, известняк и некоторые минеральные удобрения, растворяются в воде и легко слеживаются под действием влаги.

Образование кристаллизационных мостиков зависит от температуры. На процесс слеживания оказывает влияние как рост, так и снижение температуры. Слеживание известняка, увлажненного раствором поваренной соли, обусловлено возникновением мостиков в виде кристаллов NaCl. С ростом температуры, при которой осуществляется сушка увлажненного материала, от 150 до 250°C прочность материала увеличивается, что связано с образованием в зоне контакта кристаллизационных мостиков.

Причиной резкого усиления прочности сыпучих материалов, как уже отмечалось, может служить отрицательная температура. Обычно при температуре ниже -4°C происходит смерзание сыпучего материала. Смерзание связано с образованием кристаллов льда в зоне контакта, т. е. кристаллизационных мостиков.

Смерзание приводит к потере текучести материала, что затрудняет его транспортировку, погрузку и разгрузку. Особый вред приносит смерзание при перевозке сыпучих материалов железнодорожным транспортом. Объем этих перевозок поистине колоссален. Ежегодно в зимних условиях перевозится более полумиллиарда тонн сыпучих материалов, необходимых для народного хозяйства. При этом, например, при выгрузке серного колчедана в полувагоне может оставаться до 2 т смерзшегося продукта. Борьба со смерзанием сыпучих материалов во время их транспортировки в зимний период — сложная проблема.

Возможны и другие причины слеживания. К их числу относятся химические реакции между контактирующими телами и воздействие агрессивной среды, что приводит к возникновению химической связи. Наличие микроорганизмов и питательной среды для них может привести к слеживанию пищевых масс, комбикормов и их ингредиентов.

Таким образом, слеживание связано с аутогезией частиц, усилением прочности индивидуальных контактов и увеличением числа контактов между частицами. Причины слеживания обусловлены как свойствами самого сыпучего материала, так и внешними условиями.

СОЗИДАНИЕ ЧЕРЕЗ РАЗРУШЕНИЕ

Этот заголовок заимствован из трудов известного советского физико-химика академика П. А. Ребиндера. Для уяснения его сути продолжим рассмотрение процесса слеживания.

В большинстве случаев слеживание — это нежелательный процесс. Один из методов борьбы со слеживанием, как это ни парадоксально, основан на использовании процессов, лежащих в основе самого слеживания. Суть этого заключается в укрупнении частиц сыпучих материалов и образовании гранул.

Процесс образования гранул называется гранулированием. В результате гранулирования частицы сыпучих материалов укрупняются и приобретают форму зерен. Гранулирование, например, шлаков и сплавов применяется в металлургии, котельных шлаков — в энергетике, аммиачной селитры и суперфосфата — в химической промышленности, травяной муки, комбикормов и пищевых продуктов — в комбикормовой и пищевой промышленности.

Каждая гранула представляет собой монолит. Частицы внутри гранул прочно связаны, что в соответствии с условием (50) определяется ростом числа контактов N за счет уплотнения материала с одновременным увеличением прочности индивидуальных контактов $F_{\text{аут}}^{\text{II}}$.

Укрупненный гранулированный сыпучий материал обладает пониженной прочностью и повышенной текучестью. До гранулирования сыпучий материал состоял из множества мелких частиц (рис. 39, а). Число контактов

мелких частиц по линии AA и аутогезия таких частиц довольно значительны, и прочность системы относительно велика. После гранулирования из множества мелких частиц получаются крупные. Число контактов между ними по сравнению с числом контактов между мелкими частичками резко снижается. Согласно рис. 39, б число контактов по линии AA между гранулами снизилось до одного, что и обуславливает снижение прочности сыпучего материала.

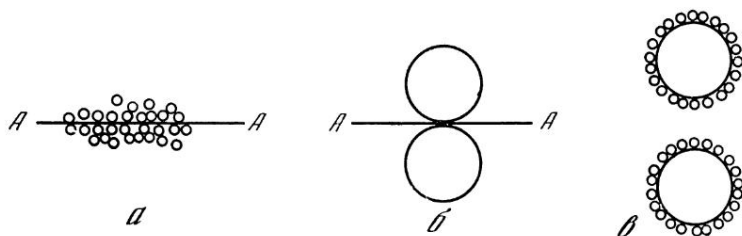


Рис. 39. Схема взаимодействия частиц (а), гранул (б) и опудренных гранул (в)

Гранулирование, однако, оказывается в некоторых случаях беспомощным в отношении действия влаги. Наличие влаги способствует образованию мостиков из кристаллов, но уже не между отдельными частицами, а между гранулами. Прочность этих мостиков иногда бывает значительной, что неизбежно ведет к слеживанию.

Для исключения отрицательного влияния влаги используют специальные приемы, например опудривание гранул. Опудривание заключается в нанесении на поверхность гранул мелких частиц инертного материала. В качестве подобного материала применяют тальк, каолин, графит, слюду, а также некоторые смеси. Мелкие частицы в результате адгезии закрепляются на поверхности гранул, образуя своеобразный защитный слой (рис. 39, в). Этот слой препятствует образованию кристаллов в зоне контактов; в результате значительно снижается взаимодействие между гранулами $F_{\text{аут}}^{\text{II}}$. Одновременно изменяется площадь контакта, определяющая аутогезию между гранулами. После опудривания фактический контакт происходит не между гранулами, а между двумя соседними мелкими частичками.

Гранулирование и последующее опудривание гранул

являются эффективным средством борьбы не только со слеживанием, но и со смерзанием.

Укрупнение частиц и образование монолита может осуществляться уплотнением под давлением. Подобный процесс обработки сыпучих материалов называют прессованием. Прессование имеет ряд особенностей. Под действием давления и при повышенной температуре изменяются свойства самих частиц. Они могут подвергаться деформации, спекаться или срастаться. После прессования образуются монолитные массы вещества в виде таблеток или брикетов, взаимодействие между которыми весьма невелико.

Прочность сыпучих и других материалов можно повысить путем измельчения. Прочность материала, содержащего крупные частицы (рис. 39, б), незначительна. Если эти частицы раздробить (рис. 39, а), то увеличивается число контактов, что в соответствии с условием (50) резко увеличивает прочность всего материала. Увеличение прочности в результате дробления материала и получения относительно мелких частиц небеспредельно. Для каждого материала существует оптимальный размер частиц (порядка 10 мкм), ниже которого прочность структуры вновь уменьшается. Это происходит в связи с возникновением в отдельных местах материала неоднородностей и внутренних напряжений.

Академик П. А. Ребиндер и его последователи разработали способы получения высокопрочных композиционных материалов через разрушение. Разрушение становится необходимой предпосылкой созидания.

Создание высокопрочных керамических, в том числе огнеупорных, и других материалов с заранее заданными свойствами затрагивает широкий круг вопросов, выходящих за рамки нашего повествования. При измельчении устраняются дефекты твердых тел и создается более плотная упаковка, т. е. увеличивается число контактов между частицами. Устранить дефекты и добиться более тонкого измельчения помогают ПАВ. Создание плотной и однородной упаковки достигается вибрацией.

Увеличение прочности материала происходит за счет роста прочности индивидуальных контактов и более плотной упаковки частиц. Покажем это на примере бетона. В обычном бетоне, состоящем из воды, цемента, щебня и гравия, между частицами образуются кристаллы, которые не обладают достаточной прочностью. Предложено

использовать песчаные бетоны без щебня и гравия. Мелкие частицы цемента и песка перемешиваются с водой, и происходит полное разрушение структуры, что способствует образованию однородной и плотной смеси. Затем происходит срастание частиц с образованием монолита. Новый бетон более стоек и прочен, не боится влаги, мороза и агрессивной среды, дешевле обычного.

Разработан новый конструкционный материал — виброколлоидный цементный клей. В его состав входят мелкие частицы песка и цемента; кроме того, в качестве добавок используются ПАВ и некоторые другие вещества. В процессе приготовления и нанесения клея на поверхность происходит разрушение структуры, значительное снижение вязкости клея, что в соответствии с условием (34) способствует лучшему заполнению выемов поверхностей. Формирование клеевых соединений происходит в результате возникновения структуры и резкого усиления прочности, что определяет качество склейки.

Аналогичным образом, т. е. в результате изменения структурно-механических свойств путем разрушения связей в дисперсной системе, а затем их восстановлением, можно получить конструкционные материалы на базе керамического или полимерного связующего, а также порошков металлов. Основа всех этих и других подобных конструкционных материалов — дисперсная система, состоящая из мелких частиц.

Итак, одним из эффективных методов борьбы против слеживания является гранулирование. Укрупнение частиц обеспечивается и другими путями, в частности пресованием. Повышение прочности материалов достигается измельчением.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ САЛФЕТКА

Обычный домашний пылесос — это своеобразное средство борьбы с адгезией. В процессе работы пылесоса можно различить две стадии: отрыв прилипших частиц загрязнений, т. е. преодоление сил адгезии этих частиц, и транспортировка частиц в пылесборник.

Отрыв прилипших частиц осуществляет воздушный поток. Вакуум, создаваемый в приемном канале пылесоса, обуславливает засасывание воздуха через сопло и шланг. За счет этого создается определенная скорость воздушного потока. У обрабатываемой поверхности около

сопла пылесоса происходит направленное движение воздуха, и возникает аэродинамическая сила. Словом, создается ситуация, подобная той, которая изображена на рис. 31.

Обрабатываемые пылесосом поверхности могут быть неровными, ворсистыми или шероховатыми. Частицы загрязнений попадают в углубления и закрепляются там; удалить подобные частицы особенно трудно. На помощь приходит щетка сопла пылесоса. Механическое воздействие щетки выступает в роли помощника и союзника по отрыву прилипших частиц загрязнений в наиболее трудных случаях.

Вторая стадия процесса осуществляется путем транспортировки частиц в шланге под действием воздушного потока, имеющего скорость 20—30 м/с. Эта скорость значительно превышает скорость свободного оседания частиц. Поэтому частицы под действием воздушного потока устремляются в корпус пылесоса, где расположены тканевый и бумажный фильтры. В результате фильтрации загрязнения собираются в корпусе пылесоса. При опорожнении корпуса производится чистка тканевого фильтра — это не что иное, как регенерация фильтрующих элементов, о чем говорилось ранее.

При работе бытового пылесоса две стадии (отрыв частиц и их транспортировку) осуществляет воздух. Роль воздуха может выполнять электрическое поле, что имеет место в электропылесосе. Работа электропылесоса основана на тех представлениях, которые были рассмотрены ранее при анализе кулоновской силы зеркального отображения.

Первая стадия, очистка поверхностей от загрязнений, осуществляется следующим образом. Под действием постоянного электрического поля происходит поляризация зарядов частиц. Поляризацией называют смещение зарядов частиц (рис. 40, *а*). В зоне контакта может происходить разряд разноименных зарядов. На частицах остаются заряды, знак которых противоположен заряду электрода (рис. 40, *б*). Заряд частиц взаимодействует с противоположным зарядом электрического поля. В результате возникает сила электростатического взаимодействия:

$$F_3 = QE, \quad (51)$$

где Q — заряд частиц; E — напряженность электрического поля.

Заряд частиц определяется диэлектрическими свойствами материала частиц и особенностями электрического поля. Напряженность электрического поля зависит от величины потенциала, подаваемого на электрод, и расстояния от электрода до запыленной поверхности. Обычно это расстояние составляет около 1 см. Большее расстояние требует увеличения потенциала электрода, а при меньшем — возникает опасность пробоя.

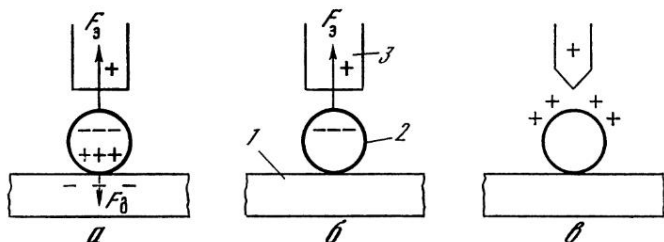


Рис. 40. Схема действия электрического поля

a — поляризация частиц в постоянном поле; *б* — взаимодействие заряженных частиц с электродом; *в* — заряд частиц переменным электрическим полем. 1 — поверхность; 2 — частица; 3 — электрод. F_3 — электростатическая сила; F_0 — дополнительная сила

Оторванные электростатическим притяжением частицы летят по направлению, соответствующему силовым линиям электрического поля. Электрическое поле выполняет те же функции, что и воздух в бытовом пылесосе, — отрыв частиц и их транспортировку.

Простейшим электропылесосом является электростатическая салфетка. Салфеткой протирают запыленные поверхности. В результате трения на ней наводится статическое электричество. Салфетка выполняет роль электрода (рис. 40, *a*), под действием которого происходит поляризация зарядов частиц, взаимодействие разноименных зарядов и преодоление адгезии частиц. Частицы устремляются к салфетке и закрепляются на ее поверхности. Салфетка одновременно является и фильтром. Возможности электростатической салфетки очень ограничены. Действие распространяется на гладкую сухую поверхность, например на запыленную мебель.

Для очистки одежды применяют электростатическую щетку, изготовленную из электролизующегося полимер-

ного материала. Действие ее аналогично электростатической салфетке.

Созданы образцы электропылесоса, электрод которого генерирует постоянное электрическое поле. Потенциал на электроде подобного электропылесоса может достигнуть 50 кВ, но сила тока незначительна. Поэтому использование подобного пылесоса безопасно. После отрыва частицы двигаются под действием электрического поля и попадают в пылесборник.

Для увеличения продолжительности работы электропылесоса в качестве источника тока можно использовать вместо электрических батарей электреты. Электреты — это вещества, способные, подобно магнитам, длительное время создавать постоянное электрическое поле. Они не требуют дозарядки, делают электропылесос более компактным и независимым от источника тока.

Электрическое поле очищает практически все сухие поверхности. В случае увлажнения поверхностей поляризация зарядов частиц не происходит, и осуществить отрыв этих частиц трудно. Электропылесос в этом случае беспомощен, как, впрочем, малоэффективен и бытовой пылесос.

Помимо постоянного электрического поля для очистки запыленных поверхностей можно использовать переменное электрическое поле. Механизм действия переменного поля в принципе отличается от механизма действия постоянного электрического поля. К электроду (рис. 40, б), на который подается постоянное напряжение, движутся частицы. При включении постоянного электрического поля частицы переходят во взвешенное состояние и устремляются к электроду. Электрод может быть выполнен в виде сетки, что дает возможность частицам проскакать электрод и попадать в пылесборник.

Электроды переменного электрического поля имеют игольчатое строение (рис. 40, в). Воздействие этого поля заключается в отталкивании частиц, их перемещении от оси электрода к периферии и образовании кратера на очищенной поверхности. Частицы перемещаются по поверхности. Такое действие переменного электрического поля объясняется отталкиванием одноименно заряженных частиц. Заряд частиц осуществляется в результате ионизации.

Изменение адгезии за счет электрического поля применяется в процессе обогащения полезных ископаемых.

Полезным ископаемым сопутствует порода, которая является балластом. Необходимо отделить пустую породу от ценного сырья. Подобный процесс называют обогащением. Он осуществляется часто с использованием воды и водных растворов. Электрическое поле позволяет проводить процесс обогащения без применения воды.

Изменение адгезии за счет электростатического взаимодействия лежит в основе электросепарации.

В зависимости от природы и размеров частицы в электрическом поле заряжаются по-разному. Это различие затем проявляется в их адгезии, что и позволяет освободиться от пустой породы, выделить полезные ископаемые или разделить сыпучие материалы в зависимости от размеров частиц.

Электрическое поле можно использовать для изменения адгезионного взаимодействия пленок: в процессе формирования адгезии и при отрыве пленок, т. е. при определении адгезионной прочности. Механизм действия электрического поля во многом аналогичен тому, что имеет место при адгезии частиц. В результате поляризации, схема которой показана на рис. 40, *a* (следует иметь в виду, что в данном случае речь идет о прилипшей пленке), происходит смещение зарядов. Если будет преобладать взаимодействие между твердыми телами (см. рис. 40, *a*, сила F_d), то наблюдается усиление адгезии пленок. В случае доминирующего взаимодействия между электродом и противоположным зарядом (сила F_a) наблюдается уменьшение адгезии пленок. Различный механизм воздействия электрического поля позволяет варьировать величиной адгезии, уменьшая или увеличивая ее в зависимости от свойств материала пленки и поверхности.

Под действием электрического поля может происходить модификация поверхности и усиление адгезии пленок. Модификация осуществляется в результате ионизации воздуха, которая вызывается разрядом. Образующиеся ионы после разряда, например, взаимодействуют с лавсаном, на поверхности которого возникают свободные радикалы и происходит процесс структурирования. Все это приводит к увеличению (примерно в 10 раз) адгезии лавсана к полиэтилену. При помощи высокочастотного газового разряда можно усилить адгезионную прочность пленки полиэтилена толщиной 200 мкм в 20 раз. После воздействия на тефлон пучком электронов адгезия к нему

очень тонкой пленки золота, толщиной всего 50—110 нм, повышается в 6 раз.

Итак, изменение адгезии может произойти под действием внешнего электрического поля. Подобные изменения используются в процессе очистки газов электрофильтрами, для обогащения минералов при помощи трибоадгезионного метода и электросепарации, с целью варьирования адгезионной прочности пленок.

ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЯ

До недавнего времени копирование документов проводилось путем воспроизводства их текста вручную или при помощи пишущей машинки. Обычная фотография не позволяет быстро и дешево получать необходимые копии. В настоящее время широко применяется электрофотография. С ее помощью можно копировать все письменные документы, статьи, книги и различные проспекты.

Электрофотография является принципиально новым способом воспроизводства различных изображений. Она основана на использовании особенностей адгезии частиц. Электрофотография может осуществляться различными методами; остановимся на процессе получения электрофотографического изображения методом ксерографии.

Суть процесса можно представить при помощи схемы, приведенной на рис. 41. Изображение переносится сначала на основу, представляющую собой поверхность, покрытую полированным слоем полупроводникового материала, чаще всего селена или окиси цинка. На полупроводниковой поверхности основы в результате электризации возникают заряды одного и того же знака (см. рис. 41, *a*), обычно положительные. К основе 1 прикладывают документ 4, с которого собираются снять копию. Все это производится в темноте. Затем документ и основу подвергают воздействию света 5. Освещенные участки 2 становятся электропроводными, и на них заряды исчезают, а на затемненных участках заряды остаются. Затемненные участки соответствуют содержанию документа. Только вместо письменных знаков на основе остаются заряды, контуры которых повторяют все: текст, рисунки, схемы, подписи, печати и т. д., иначе говоря, оставшиеся электрические заряды образуют скрытое электрическое изображение.

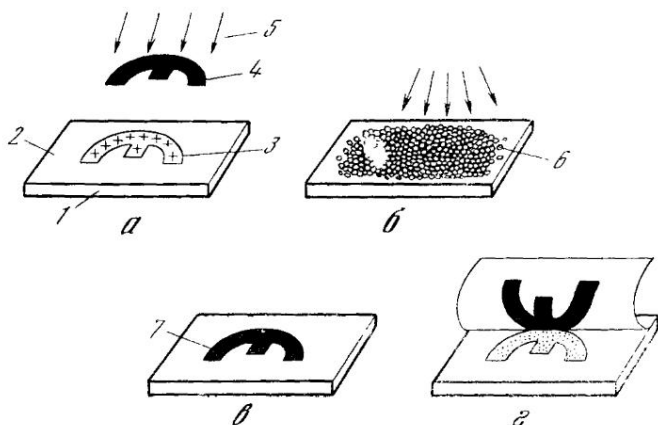


Рис. 41. Процессы электрофотографии

a — получение скрытого изображения; *б* — нанесение частиц; *в* — проявление изображения; *г* — перенос на бумагу или формную основу

Получение скрытого изображения можно считать первой стадией процесса электрофотографии. Как и в обычной фотографии, скрытое изображение необходимо проявить. Здесь в полной мере дает о себе знать адгезия, а точнее, один из ее видов — адгезия частиц.

Вторая стадия процесса электрофотографирования заключается в том, что на основу наносят частицы (рис. 41, б), выполняющие роль проявителя. Частицы под действием электрической компоненты адгезии закрепляются на тех участках, которые имеют заряды. Тем самым они проявляют скрытое изображение (рис. 41, в).

Частицы проявляющего порошка имеют более или менее одинаковые размеры. Эти частицы должны иметь заряды, противоположные по знаку зарядам скрытого изображения. Если частицы получают одноименные заряды, то вместо адгезии частиц будет наблюдаться их отталкивание от скрытого изображения. Частицы получают заряд в результате трения, а также после распыления в электрическом поле. Заметим, что частицы проявителя могут содержать красящие вещества для сообщения получаемым оттискам необходимого цвета.

Третья стадия процесса электрофотографии — перенос изображения на бумагу (рис. 41, г). При этом преодолевается сила адгезии порошка-проявителя к полупроводниковому слою и возникает адгезия частиц к

бумаге. Для переноса частиц используют постоянное электрическое поле, под действием которого возникают поляризованные заряды и происходит отрыв частиц от полупроводникового слоя. По существу реализуются те же процессы, которые были рассмотрены ранее и изображены на рис. 40, а, б.

Кроме постоянного электрического поля для переноса изображения применяют коронный разряд, который является одной из форм самопроизвольного разряда в газах. Под действием коронного разряда происходит отрыв частиц, так же как и в случае применения постоянного электрического поля.

Перенос изображения осуществляют еще и механическим путем; для этой цели, например, бумага прижимается к основе резиновым валиком. Если резиновый валик обладает токопроводящими свойствами и подключен к источнику постоянного тока, то перенос изображения происходит за счет совместного действия электрического поля и прижима.

Последняя стадия фотографического процесса — фиксация полученного изображения. В электрофотографии эта стадия заключается в закреплении нанесенного слоя частиц и образовании из слоя прилипших частиц сплошной пленки. Закрепление достигается нагреванием или применением растворителей. При нагревании прилипшие частицы проявителя, содержащие красящие вещества, становятся вязкими и сливаются в единый слой. Нагревание способствует проникновению краски в поры бумаги и росту адгезии. Аналогичным образом действуют пары растворителей: частицы набухают и размягчаются. В результате образуется слой краски и усиливается адгезия к бумаге.

На рис. 41 представлена упрощенная схема электрофотографического процесса, осуществляемого методом ксерографии.

В одном из методов электрофотографии полученное скрытое изображение переносят не на бумагу (см. рис. 41, г), а на форму — основу для офсетной печати, а уже затем механическим путем получают необходимое число копий.

Электрофотография находится в становлении и развитии: применяются новые материалы, совершенствуются цветные копии, упрощается процесс, улучшается качество изображений. Неизменным остается лишь одно — *в основе электрофотографии лежит адгезия.*

ПЛАВАЮЩАЯ ИГОЛКА

При некоторых условиях обыкновенная швейная игла может плавать на поверхности воды. Обычно игла тонет, и не просто потому, что сталь плотнее воды. Стальная поверхность иглы гидрофильна, и вода смачивает ее. Образующиеся на границе раздела фаз поверхностные натяжения (рис. 42, *a*) способствуют погружению иглы в воду, а уже затем игла идет ко дну, так как плотность стали превышает плотность воды.

Чтобы заставить иглу плавать, гидрофобизируют ее поверхность. Для этой цели необходимо нанести слой жира (стеарина) или потереть ее замасленными пальцами.

Механизм удержания иглы на поверхности жидкости можно представить при помощи рис. 42, *b*, на котором изображен разрез иглы. Под действием веса иглы P поверхность жидкости прогибается и увеличивается площадь контакта иглы с жидкостью. По отношению к гидрофобной игле величина краевого угла θ становится больше 90° . Изменяется направление действия поверхностных натяжений. Поверхностные натяжения металла и жидкости на границе с газовой средой ($\sigma_{тг}$ и $\sigma_{жг}$) оказываются направленными в одну сторону и превышают поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом $\sigma_{тж}$. Возникает новое равновесие сил, поверхностное натяжение в состоянии противодействовать разрыву пленки жидкости и воспринимает силу P , вызванную весом иглы. Несмачивание и пониженная адгезия к воде гидрофобной поверхности иглы способствуют удержанию ее на воде.

Для удержания иглы на плаву необходимо выполнить еще ряд условий. Прежде всего, игла помещается на поверхность воды осторожно и одновременно всей поверхностью; должно отсутствовать колебание поверхности воды. При соблюдении этих условий, несмотря на значительное превышение плотности материала иглы по сравнению с плотностью воды, она плавает.

Опыт с иглой носит иллюстративный характер и далек от практики, но его основа — смачивание и несмачивание водой различных поверхностей — определяет практически важные процессы. Одним из этих процессов является флотация.

Ранее рассматривались методы сухого обогащения

полезных ископаемых, в которых не применяются жидкости. Часто сухие методы обогащения неприемлемы. Поэтому отделение полезных ископаемых от пустой породы на практике производят в водной среде с учетом особенностей смачивания.

Флотацией* называют метод обогащения полезных ископаемых, основанный на различии в смачивании поверхности частиц. Для осуществления пленочной флотации мелко измельченную руду тонким слоем насыпают

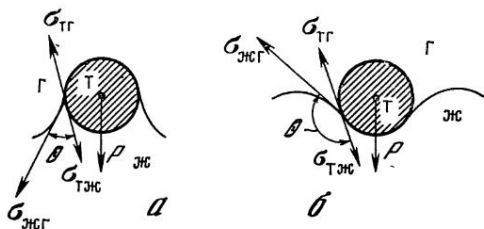


Рис. 42. Схема, демонстрирующая положение иглы на воде в случае гидрофильной (а) и гидрофобной (б) поверхности иглы

с небольшой высоты на поверхность воды. Некоторые минералы, в частности сульфиды (например, FeS_2 — сульфид железа), гидрофобны, плохо смачиваются водой и, подобно иглке в нашем примере, удерживаются на поверхности воды. Гидрофильные частицы пустой породы смачиваются и захватываются водой, тонут и опускаются на дно аппарата. Образующийся на поверхности воды слой частиц полезных ископаемых, освобожденный от пустой породы, собирают и используют по назначению. Смачивание и несмачивание являются основой пленочной флотации.

Гидрофобизировать поверхность частиц можно искусственно. На заре развития методов обогащения, в конце прошлого века, начали применять масляную флотацию. В водную среду вводили нерастворимые в воде различные масла. Это могли быть, в частности, битуминозные вещества. Мелкие частицы раздробленного минерала смачивались маслом и покрывались масляным слоем, превращаясь в своеобразные гранулы.

В дальнейшем процесс масляной флотации напоминает пленочную. Частицы пустой породы, хорошо смачиваемые

* Слово *флотация* происходит от английского *float* — плавать на поверхности.

водой и практически не смачиваемые маслом, оседают на дно или остаются в объеме, а на поверхности воды концентрируются частицы ценных минералов, покрытых слоем масла.

Масляную флотацию в таком виде в настоящее время практически не применяют, а пленочную используют лишь в качестве вспомогательной операции. Пленочная и масляная флотации оказались малоэффективными при обогащении большинства минералов. В этих методах адгезия и смачивание проявляются при определенных условиях. Когда речь шла о плавающей гидрофобной иголке, обращалось внимание на необходимость соблюдения равновесия на границе раздела вода—воздух. При практической же флотации происходит перемешивание, в результате которого равновесие на поверхности воды нарушается и даже гидрофобные частицы могут утонуть. На помощь приходит пенная флотация.

Суть пенной флотации та же — избирательное смачивание и адгезия частиц на границе раздела вода—воздух. Только этот процесс осуществляется не на границе поверхности воды с воздушной средой, а с пузырьком воздуха, находящимся в объеме воды.

Пузырьки воздуха подаются снизу в объем флотационной пульпы, которая представляет собой взвесь частиц в воде с добавкой флотационных реагентов, в том числе ПАВ. При прохождении пузырьками воздуха слоя воды к их стенкам прилипают гидрофобные частицы. Эти частицы вместе с пузырьками всплывают на поверхность, и таким образом полезные ископаемые отделяются от пустой породы.

В пенной флотации пузырьки воздуха выполняют несколько функций. Они способствуют лучшему перемешиванию исходной пульпы, выступают в роли носителей, закрепляющих на своей поверхности гидрофобные частицы, переводят частицы из объема на поверхность. Пенная флотация в настоящее время является одним из самых распространенных и универсальных методов обогащения полезных ископаемых в водной среде.

Элементарный акт пенной флотации заключается в адгезии частиц минералов к пузырьку. Вспомним выражение «как с гуся вода», которое означает, что адгезия капель воды к гидрофобной поверхности будет минимальной. Диаметрально противоположно ведут себя гидрофобные частицы по отношению к пузырьку воздуха. Осо-

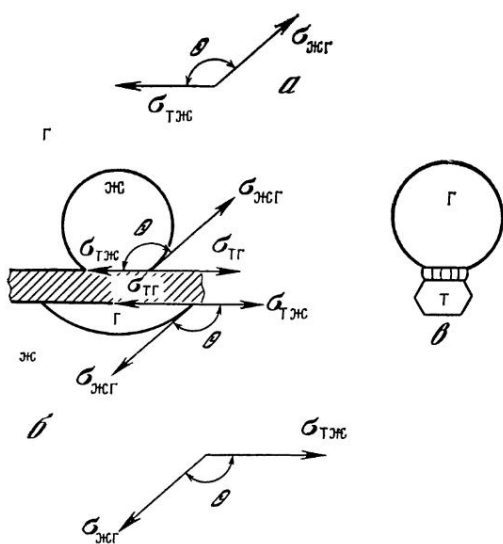


Рис. 43. Адгезия капли (а), пузырька (б) и частицы к пузырьку через прослойку (в)

бенности адгезии частиц к капле и к пузырьку показаны на рис. 43, а и б.

Капля жидкости (воды) на гидрофобной поверхности окружена газовой (воздушной) средой. Это положение капли показано сверху плоской поверхности (рис. 43, а). Краевой угол θ , схематическое изображение которого приведено в верхней части рисунка между векторами поверхностных натяжений $\sigma_{ЖГ}$ и $\sigma_{ТЖ}$, больше 90° . Снизу гидрофобной поверхности (рис. 43, б) показан пузырек газа (воздуха), который окружен жидкой (водной) средой. Положение пузырька определяется равновесием поверхностных натяжений на границе раздела фаз: $\sigma_{ТГ}$, $\sigma_{ТЖ}$ и $\sigma_{ЖГ}$. Внизу дано схематическое изображение векторов поверхностных натяжений $\sigma_{ЖГ}$ и $\sigma_{ТЖ}$ и краевого угла между ними. При сопоставлении верхней и нижней частей схемы, т. е. пузырька жидкости в газовой среде и пузырька газа в жидкости, следует обратить внимание на то, что величина краевого угла одна и та же и превышает 90° .

Равновесную работу адгезии частиц к пузырьку на границе раздела твердое тело—газ можно вывести из тех же представлений, которые были рассмотрены (см.

рис. 9) в случае адгезии жидкости к твердым поверхностям. Аналогичным образом можно показать, что равновесная работа адгезии частиц к пузырьку равна:

$$W_{\text{ад}} = \sigma_{\text{жг}} (1 - \cos \theta). \quad (52)$$

Формула (52) по структуре напоминает формулу (13), но и отличается от нее. Эта формула определяет не адгезию капель (верхняя часть поверхности, рис. 43, а), а адгезию пузырька газа (нижняя часть поверхности, рис. 43, б). Величина $\cos \theta$ в формуле (52) отрицательна; это означает, что на гидрофобной поверхности, когда $\theta > 90^\circ$ и $\cos \theta < 0$, величина равновесной работы частиц к пузырьку будет максимальной. Напомним, что на гидрофобной поверхности, напротив, адгезия капель будет минимальной.

Итак, необходимым условием адгезии и закрепления частиц на пузырьках воздуха является гидрофобность, т. е. несмачивание поверхности этих частиц.

Широкое применение пенной флотации обусловлено возможностью регулирования свойств частиц и разделения минералов, близких по своим поверхностным свойствам. Фактически между твердой поверхностью минеральной частицы и пузырьком воздуха существует прослойка. Подобная прослойка показана на рис. 43, в в увеличенном масштабе. Именно эта прослойка оказывает порой решающее влияние на адгезию частиц к пузырьку.

Наличие жидкой среды между воздухом и твердой поверхностью позволяет путем введения в воду специальных веществ и адсорбции их на поверхности частиц изменять свойства этих частиц. Например, сравнительно легко можно отделить от пустой породы свинцово-цинковую смесь. Входящие в руду минералы PbS и ZnS обладают сходными поверхностными свойствами, и путем обычной флотации их трудно отделить друг от друга. Вводя добавки, гидрофобизируют сульфид свинца, частицы которого закрепляются на пузырьке (рис. 43, в), а частицы цинкового минерала осаждаются на дно.

Мощным средством регулирования адгезии частиц к пузырьку являются ПАВ. Адсорбируясь определенным образом на границе раздела фаз, в данном случае на поверхности твердого тела в прослойке жидкости, они изменяют свойства твердой поверхности. Для гидрофобизации поверхности необходимо, чтобы длинный гидрофобный радикал молекул ПАВ (см. рис. 26, а) был

обращен в сторону водной среды. Кроме гидрофобизации твердой поверхности ПАВ в водной среде флотационной пульпы способствуют пенообразованию и увеличивают время жизни пен.

Подбирая реагенты, изменяя их концентрацию, температуру и свойства среды (величину рН, характеризующую кислотность или щелочность), можно добиться избирательности адгезии частиц. Если на пузырьке закрепляются частицы полезных ископаемых, то частицы пустой породы скапливаются в нижней части пульпы.

При помощи вспенивания осуществляются флотация и стирка, связанная с удалением олеофильных загрязнений. Однако и в технике, и в быту нередко возникает обратная задача: отделение самой пены с минимальной потерей жидкой фазы. И тут приходят на помощь осознанные или эмпирически обнаруженные закономерности адгезии пен.

В быту проблема удаления пены возникает, например, при варке варенья. Если вычерпывать пену ложкой, то вместе со стойкой пеной, подлежащей удалению, уносится значительное количество самого варенья — сиропа. Поэтому опытные хозяйки пену не вычерпывают, а снимают ее внешней, выпуклой стороной ложки. Сироп вытекает, а стойкая пена, имеющая бóльшую адгезию, остается на ложке, и ее можно количественно удалить без потерь основного продукта.

При флотации жидкая среда активно воздействует на свойства твердых поверхностей. Встречаются случаи, когда сама жидкость после соприкосновения с твердой поверхностью в результате адгезии претерпевает существенное изменение. Это относится к биологически активным веществам, к числу которых принадлежат кровь и плазма.

Взаимодействие смачиваемых поверхностей с кровью имеет большое значение в связи с созданием различных искусственных аппаратов: почек, сердца, органов кровообращения. Эти и другие аппараты, широко используемые современной медициной, основаны на контакте крови с различными поверхностями. Смачивание и несмачивание поверхностей оказывают влияние на свертывание крови. Усиление адгезии жидкости к поверхности способствует разрушению форменных элементов крови, ускоряет процесс свертывания и является крайне нежелательным, а в некоторых случаях просто недопусти-

мым. Поэтому в качестве антиадгезионных материалов применяются такие, которые обладают олеофобными свойствами по отношению к крови.

В настоящее время имеется много препаратов — антикоагулянтов, которые препятствуют свертыванию крови. Эти препараты, однако, не всегда можно применить, а их действие ограничено. Поэтому антикоагулянты не исключают необходимости применения антиадгезионных материалов в различных искусственных аппаратах.

Таким образом, адгезия и смачивание оказывают влияние не только на процесс обогащения руд, но и на использование искусственных органов в медицине.

ОТ СМАЗКИ...

Остановимся еще на некоторых технических проблемах, в основе которых лежит использование различных видов адгезии.

Роль смазки огромна. Она обеспечивает работу по существу всех машин. Смазка осуществляется при помощи различных материалов, в том числе и смазочных масел. Адгезия создает необходимое условие закрепления смазочного материала, который экранирует трущиеся поверхности. В то же время для приборных масел, например, растекание и адгезия должны быть ограниченны. Иначе подобные смазочные материалы трудно будет закрепить на определенной площади. Поэтому между работой адгезии, краевым углом, вязкостью и растеканием существует соотношение, которое определяется назначением смазочного материала. Для приборных масел оптимальное соотношение между адгезией и растеканием реализуется для капель, имеющих краевой угол в пределах 25—40°.

Космические полеты неизбежно связаны с нахождением механизмов в вакууме. Трудности возникают при работе с жидкими агрессивными средами. Жидкие смазочные материалы в вакууме испаряются и теряют свои смазочные свойства.

Жидкие смазки оказываются непригодными в условиях работы узлов трения и силовых передач под большими нагрузками. В этих условиях жидкая и даже консистентная загущенная смазка выдавливаются из зоны контакта соприкасающихся поверхностей и смазка перестает играть присущую ей роль.

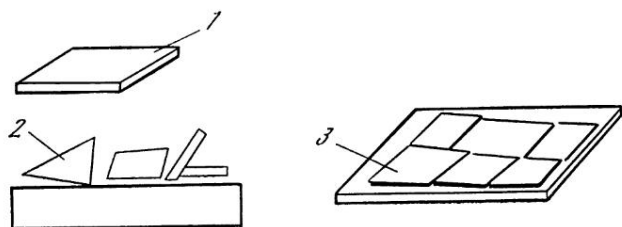


Рис. 44. Адгезия твердых смазок

1 — чешуйчатая частица; 2 — первоначальное положение; 3 — образование смазочного слоя

Появление мощных машин и двигателей, космические полеты, новые отрасли промышленности (атомная энергетика, вакуумная техника и др.) заставляют изыскивать принципиально новые смазочные материалы. К числу таких материалов следует отнести твердые пленки, которые образуются из слоя прилипших частиц.

Как антифрикционный твердый материал (графит) использовали уже давно. Минеральные масла с добавками порошка графита (нигролы) применяли для силовых передач в грузовых автомобилях и тракторах. Для опорных поверхностей выжимного подшипника сцепления использовали графитовые кольца. В качестве материалов твердых смазок для новых направлений техники используют не только порошки графита, но и некоторые фтористые соединения, дисульфид молибдена и др. Материалы твердых смазок стойки к действию окислителей и вакуума. Они состоят из частиц, имеющих кристаллическое строение и чешуйчатую форму (рис.44,1). В одном из вариантов применения порошок наносят тонким слоем на экранируемую поверхность. Избыток порошка удаляют, а на поверхности в результате адгезии образуется слой частиц. Слой частиц — это еще не слой смазки. Частицы по отношению к поверхности ориентированы произвольно и не образуют единого целого.

Смазочный слой формируется при трении одной поверхности о другую. Кристаллические частицы ориентируются относительно трущейся поверхности, одновременно увеличиваются площадь контакта и адгезия частиц. При трении возникает и упрочняется аутогезия. Слой прилипших частиц превращается в единое целое. При-

работка трущихся поверхностей способствует формированию однородной по толщине прочно прилипшей пленки.

Таким образом, сами трущиеся поверхности формируют для себя твердую пленку смазочного материала. Образующиеся пленки смазочных материалов закрепляются прочно на стальных поверхностях и менее прочно на алюминиевых и титановых. Для усиления адгезии смазочных твердых пленок разработан ряд способов. К числу их относится применение промежуточного подслоя между поверхностью и слоем смазки. Промежуточный подслоя может формироваться из порошка дисульфида молибдена, химически активного по отношению к металлам.

Для усиления адгезии смазочных пленок в их состав вводят связующие добавки — органические смолы и неорганические вещества в виде солей различных металлов. Связующие добавки способствуют лучшей ориентации частиц в процессе трения, усиливают адгезию и аутогезию. Например, дисульфид молибдена замешивают в минеральное масло. Попадая на трущиеся поверхности, он образует на них пленку твердой смазки. Дисульфид молибдена и некоторые другие вещества используют также в полимерных композициях, из которых изготовляют втулки или сепараторы для шарикоподшипников. При вращении подшипника материал сепаратора попадает на поверхность металла, образуя твердую антифрикционную пленку. Такие подшипники не требуют смазки до конца срока службы.

На практике встречаются случаи, и довольно часто, когда в результате соприкосновения частиц с поверхностью и адгезии возникают нежелательные последствия. В процессе опорожнения бункера с мукой, например, значительная часть продукта может остаться в нем. Порошкообразные материалы налипают на внутренние стенки трубопроводов, рабочих органов машин и на другие поверхности, соприкасающиеся с этими продуктами. В результате теряется ценное сырье, а в связи с необходимостью очистки простаивает технологическое оборудование.

Исключить или снизить адгезию сыпучих продуктов можно путем использования антиадгезионных материалов. Эти материалы в виде пленок наносят на внутреннюю поверхность емкостей, трубопроводов и другого оборудования.

Используемые для этой цели антиадгезионные материалы обладают пониженной адгезией по отношению к сыпучим продуктам, но и сама адгезия этих материалов к поверхности незначительна. Применение антиадгезионных материалов возможно только путем сообщения им адгезионных свойств. Возникает противоречие: с одной стороны, антиадгезионные пленки должны обладать незначительной адгезионной способностью к сыпучим материалам, а с другой — собственная адгезия пленок к экранлируемой поверхности должна быть значительной.

Современная наука разрешила это, казалось, неразрешимое противоречие. Прежде всего в качестве антиадгезионных необходимо использовать низкоэнергетические полимерные материалы. Наименьшей поверхностной энергией из доступных полимерных материалов обладают фторопласты. Их удельная свободная поверхностная энергия, как уже отмечалось, составляет всего 13—15 мДж/м². Однако стоимость этих материалов относительно велика. Полиэтилены $[-\text{CH}_2 - \text{CH}_2-]_n$ различных марок примерно в 10 раз дешевле фторопластов. Доступность сырья и незначительная стоимость создают благоприятные условия для широкого применения полиэтилена, несмотря на то что удельная свободная поверхностная энергия его несколько выше фторопластов и составляет примерно 30—40 мДж/м².

Не менее важным для практики является закрепление антиадгезионных материалов в виде пленок на различных поверхностях. Способов применения полимерных антиадгезионных пленок разработано сравнительно много. Прежде всего, можно применять листовый материал, который наклеивают, наклепывают или каким-либо другим способом закрепляют на поверхности. Широкое распространение получило формирование покрытий из порошкообразных препаратов. После распыления на поверхности образуется слой прилипших частиц, подобно тому, как это изображено на рис. 3, б, в. Затем из этого слоя получают пленку.

В процессе нагревания при образовании пленки может происходить деструкция полимера и возникновение функциональных групп, способных за счет химического взаимодействия усиливать адгезию. Возможно нанесение полимерных материалов из различных растворов, после застывания которых образуется прилипшая пленка.

При помощи адгезии пленок получают принципиально новые материалы, к числу которых относится триплекс — трехслойное безосколочное стекло. Оно образуется в результате адгезии двух листов органического или силикатного стекла к промежуточной пленке. В качестве этой пленки применяют полимерные материалы (поливинилбутираль и др.), обладающие клеящим свойством. Пленку помещают между двумя листами стекла, а затем систему подвергают термообработке. При повышенном давлении (18—20 атм) и температуре, которая должна превышать температуру текучести материала пленки, происходит размягчение полимера пленки, образуется плотный контакт с поверхностью стекла и значительная адгезия поверхности стекол к пленке. Триплекс не дает осколков при ударе, а может лишь растрескиваться. В связи с этим триплекс широко применяют для остекления автомобилей, самолетов, вертолетов, судов, подвижного состава городского и железнодорожного транспорта и в других случаях.

Новый изоляционный и термостойкий материал — слюдопласт — готовится из отходов слюдяных производств. Исключительная аутогезия чешуек слюды, извлеченных из отходов и тщательно очищенных от примесей, превращает слой частиц в монолит. Образующийся материал не горит, стоек к кислотам, не пропускает электрический ток и в несколько раз дешевле материала, приготовленного из сплошной щиповой слюды.

...ДО ПЛАЗМЫ

В технике широко используется металлизация, т. е. покрытие поверхности изделий тонким прилипшим слоем металла или сплава для сообщения физико-химических и механических свойств. Металлизации могут подвергнуться не только металлы, но и неметаллические материалы (полимеры, стекло, керамика, бумага, ткань), которые получают новые качества. Так, металлизация бумаги или картона сообщает им токопроводящие свойства, что широко используется в радиотехнических устройствах. Прилипшая пленка придает алюминиевой поверхности такую твердость, что без труда можно резать стекло острым краем такой алюминиевой пластинки. Подобные пленки получают в гальванической ванне с помощью импульсов переменного тока.

Используя преимущества алюминия как наиболее легкого металла, при помощи металлизации можно существенно повысить износостойкость деталей, изготовленных из алюминия, и придать этим деталям разнообразную окраску. Прилипшие пленки кобальта окрашивают алюминий в черный цвет, а селен сообщает бежевые тона; пленки меди могут придать зеленый, вишневый или серый оттенки. Подобные «краски» долговечны, не выцветают и могут быть использованы для оформления панелей радиоприемников, телевизоров, различной бытовой техники, а также для декоративной отделки зданий.

В зависимости от особенности формирования адгезии пленок все способы металлизации можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся металлические покрытия, для которых характерно наличие границы раздела фаз, например пленки, полученные из слоя жидкости или частиц, а также путем холодной сварки. Прилипшие пленки второй группы возникают в результате диффузии и взаимного проникновения адгезива в субстрат и субстрата в адгезив. Ко второй группе можно отнести покрытия, полученные методом гальванопластики и плакированием, т. е. нанесением и закреплением листового материала в результате давления в сочетании с нагревом.

Образование прилипших металлических пленок может происходить в результате процесса «схватывания» металла, или так называемой холодной сварки. Наконец, металлические пленки образуются при нанесении расплава, как, например, при горячем цинковании.

Площадь фактического контакта поверхностей, как уже отмечалось ранее (см. рис. 16), зависит от их шероховатости. Под действием внешнего давления, направленного нормально к поверхности, происходит прижим контактирующих тел и деформация выступов шероховатой поверхности. В результате растет не только площадь контакта, но происходит сближение тел и возникновение новых точек контакта. Процесс идет до тех пор, пока контакт между поверхностями будет осуществляться не только по выступам, но и по впадинам шероховатых поверхностей.

Расстояние между поверхностями в зоне контакта первоначально не менее 1 нм, что дает возможность проявиться лишь межмолекулярным силам. В результате давления поверхности сближаются. Кроме межмолеку-

лярных сил включаются металлические валентные связи, которые значительно превосходят межмолекулярные силы. Схватывание — это процесс образования прочной химической связи, в данном случае металлической, между двумя поверхностями. Увеличение адгезии металлических поверхностей — пленки к основе — обязано образованию металлических валентных связей.

Используя процесс схватывания, можно получить тонкие металлические пленки методом натирания. Этот метод напоминает процесс образования слоя твердого смазочного материала. Натиранием можно осуществить серебрение металлических поверхностей. В процессе натирания частицы серебра укрупняются, образуя тонкий прилипший слой (см. рис. 44). Серебряные пленки сравнительно легко образуются на меди, цинке, свинце и некоторых других металлах. На алюминиевые изделия можно нанести тонкие слои золота, серебра и индия.

Соприкосновение частиц с поверхностью обуславливает возникновение адгезии и ведет к образованию покрытий. Адгезия является необходимым условием их формирования. Для повышения адгезионной прочности образующихся пленок широко применяют энергию электрического поля, плазму и вакуум.

Прилипшие пленки можно получать с помощью электрического тока. Золочение, никелирование и формирование других металлических покрытий электроосаждением практически применяется уже 140 лет. При пропускании тока на поверхности происходит осаждение ионов металлов, находящихся в растворе. При помощи электроосаждения можно получать пленки различных металлов. Образование прилипших пленок происходит в несколько стадий: адсорбция ионов металла, разрядка этих ионов, образование зародышей пленки, диффузия в поверхность субстрата, рост прилипшей пленки путем образования новых и разрастания старых зародышей.

Отличительной особенностью образования прилипших пленок электроосаждением является формирование пленки непосредственно при зарождении новой фазы и органическое сочетание ее с основой. Эти обстоятельства позволяют создать сравнительно тонкие пленки и придать им значительную адгезию. Получение электроосаждением очень тонких пленок все же затруднено. На помощь приходит вакуум. Материал будущей пленки под действием вакуума и высокой температуры переводят в паробраз-

ное состояние. Пары первоначально адсорбируются на экранируемой поверхности. Конденсируясь, они образуют прочно прилипшую пленку. Процессы адсорбции и конденсации, предшествующие адгезии, непосредственно влияют на адгезионную прочность.

Методом вакуумного напыления можно получить металлические и неметаллические пленки, толщина которых составляет единицы нанометров. В качестве материалов пленки используют титан, алюминий и его окислы, двуокись кремния и ряд других. В радиотехнической промышленности применяются хромовые пленки, наносимые на стеклянные поверхности.

При помощи вакуумного напыления получают комбинированные пленки из металлов и полимеров (так называемые металлополимерные пленки) толщиной до 1 нм. Подобные пленки могут создаваться из таких металлов, как калий и натрий. Напылением в вакууме образуются металлические пленки на полимерах, изоляторах и других неметаллических поверхностях. Это дает возможность сообщать поверхностям токопроводящие или полупроводниковые свойства.

Различные способы получения прилипших пленок применяют при изготовлении зеркал. Зеркальная поверхность образуется в результате адгезии пленки металла на гладком стекле, с поверхности которого предварительно удаляются загрязнения. До недавнего времени в качестве металла для получения зеркальной поверхности использовали серебро. Процесс серебрения заключается в осаждении металла на стекле из раствора азотнокислого серебра (AgNO_3). При этом достигается равномерная толщина прилипшей пленки серебра, которая не превышает обычно 0,3 мкм. Даже при такой незначительной толщине для получения 1 м^2 зеркальной поверхности расходуется около 3 г серебра. Учитывая массовое производство зеркал с целью экономии дорогостоящего металла, в настоящее время зеркальную поверхность получают из алюминия путем его термического испарения и напыления в вакууме. Испарение алюминия осуществляют при давлении $1,3 \cdot 10^{-3}$ — $6,7 \cdot 10^{-2}$ Па, или 10^{-5} — $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Толщина алюминиевой пленки не должна быть менее 0,12 мкм. Практически трудно получить прилипшую пленку алюминия одинаковой толщины. Это приводит к ухудшению отражательной способности алюминированных зеркал по сравнению с посеребренными.

Для зеркал технического назначения могут применяться отражающие пленки, которые изготавливаются из серебра, золота, палладия, платины, свинца, хрома, никеля и других металлов.

Для образования пленки из тугоплавких материалов используют струю плазмы. Образование пленок плазменным методом применяют для нанесения твердых смазок, в частности графита, сернистых молибдена и вольфрама (MoS_2 , WS_2). В других случаях для формирования покрытий в качестве тугоплавких и высокопрочных материалов используют карбиды и бориды металлов, т. е. соединения типа Me_mC_n и Me_gB_p . Подобные материалы имеют температуру плавления от 2000 до 4000 К.

Струю плазмы получают при прохождении через электрическую дугу плазмообразующего газа (аргона, неона, водорода). Температура плазмы, которая используется для создания покрытий, превышает 4000 К. Струя плазмы выполняет двойную роль. Она обуславливает размягчение частиц и предопределяет их повышенную адгезию к поверхности. Кроме того, струя плазмы направляет поток частиц, способствуя тем самым формированию пленки из прилипших оплавленных и размягченных частиц. Толщина образуемых покрытий несколько больше по сравнению с вакуумным напылением и составляет единицы и десятки нанометров.

Таким образом, заканчивая изложение материала, с полным основанием можно заключить:

сфера действия — все, с чем связана жизнь и деятельность человека; в одних случаях адгезия выступает как определяющее, а в других — как сопутствующее явление.

ВМЕСТО ЭПИЛОГА:

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АДГЕЗИИ

Термин — адгезия, или прилипание: явление, которое возникает на границе раздела фаз при контакте двух конденсированных тел и характеризует связь между ними.

Виды — адгезия жидкости, пленок и частиц (см. рис. «Древо адгезии»).

Конкуренты и сопутствующие явления — аутогезия и когезия.

Действие — полезное или вредное.

Место действия — всюду на Земле и в Космосе.

Начало действия — с зарождением Вселенной.

Количественная оценка — адгезия жидкости измеряется работой, частиц — силой, пленок — адгезионной прочностью.

Причины — межмолекулярные силы, кулоновская или сила зеркального отображения, электрическая сила за счет донорно-акцепторной связи, капиллярная сила, химическая связь, расклинивающее давление тонкого слоя жидкости.

Следствия — экранировка поверхностей прилипшими пленками; преимущественное удержание относительно мелких частиц; формирование капель или слоя жидкости на твердой поверхности.

Основные понятия — поверхностное натяжение и удельная свободная поверхностная энергия; гидрофобность и гидрофильность, низкоэнергетические и высокоэнергетические поверхности; гистерезис, критическое поверхностное натяжение.

Место возникновения — площадь контакта, определяемая упругими свойствами тел, размерами выступов, формой и размерами частиц, способностью поверхностей смачиваться, вязкостью жидкости, микрореологическими процессами, адсорбцией и диффузией.

Влияние окружающей среды — зависимость адгезии от влажности, температуры, состава и давления газовой среды, свойств жидкости и растворенных в ней веществ.

Изменение адгезии осуществляется варьированием свойств поверхностей и внешних условий.

Склеивание — процесс возникновения адгезии слоя клея к двум поверхностям и когезионной прочности в самом слое.

Сфера действия:

очистка газов и воздуха в фильтрах и электрофильтрах; обогащение минералов электрической сепарацией, сухими методами и флотацией;

транспортирование, псевдооживление, пневмотранспорт, трение, перемещение, слеживание и гранулирование сыпучих и порошкообразных материалов;

атмосферные и производственные процессы, связанные с возникновением адгезии в результате оседания частиц из воздушного потока, осаждения на препятствия, термофореза и с отрывом частиц воздушным потоком с учетом структуры пограничного слоя;

русовые процессы, водная эрозия, работа земснарядов, мойка транспорта, фильтрация воды;

внедрение передовой технологии в условиях космического полета, электрофотографии, микроминиатюризации; использование искусственных аппаратов в медицине и твердых смазочных материалов;

создание электроосаждением, при помощи вакуума, распылением и другими способами лакокрасочных, полимерных, металлических прилипших пленок и обеспечение их долговечности;

вытеснение одной жидкости другой, добыча нефти, транспортирование ее в трубопроводах, смазка и применение смазочных материалов;

получение новых прочных, водо- и термостойких, изоляционных и других композиционных материалов с заранее заданными свойствами;

пахота, влагоудержание почвы, питание растений, проникновение влаги в здания;

производство бумаги, письменность, издание книг, журналов и газет;

разлив металла и отливка, сварка и пайка, применение жидких металлов, формирование стеклянных изделий из расплава, движение капель и пленок;

применение удобрений, инсектицидов, косметических средств, водонепроницаемых материалов, клеевых композиций, поверхностно-активных веществ;

стирка и чистка одежды, запыленность и уборка помещений, использование мыла и мытье окон.

Отрасли — аэродинамика, космонавтика, металлургия, радиоэлектроника, строительство, охрана окружающей среды, машиностроение, транспорт, деревообрабатывающая промышленность, добыча полезных ископаемых, производство медицинской аппаратуры и медикаментов, продуктов питания и комбикормов, полиграфия, применение полимеров, синтетических и лакокрасочных материалов, мелиорация и орошение, почвоведение и растениеводство, земледелие, производство и использование удобрений, декоративное и прикладное искусство, промышленность службы быта — в общем, Космос, сельскохозяйственное и промышленное производство, здравоохранение, просвещение, т. е. все, с чем связана деятельность человека; в одних случаях адгезия выступает как определяющее, а в других — как сопутствующее явление.

СОДЕРЖАНИЕ

От автора	3	Ноги и крылья растений	75
Рекомендуемая литература	4	Кажущееся противоречие	78
АДГЕЗИЯ — БУДНИ И ПРОГРЕСС		Принцесса на горошине	80
Терминология	5	Симметрия и асимметрия	84
Виды адгезии	8	Непромокаемые материалы	88
Конкуренция и победа сильнее- шего	11	Аромат цветов	91
Хлеб и адгезия	13	Почему клей склеивает?	95
Будни	15	Запах грозы и вакуум Луны	100
Подобно «сиамским близнецам»	19	Подобно клину	105
Зеленый санитар	22	Небольшим количеством— новое качество	108
И в Космосе — то же	26	Яичница без масла и борьба с обледенением	111
На Луне	28	СЛЕДСТВИЯ АДГЕЗИИ	
Водные лыжи и жидкий металл	31	Буран	116
Одна из загадок Космоса	36	Пыль столбом и желтые дожди	120
Лебедь, рак и щука	38	Почему сгорает спутник?	126
А воз и ныне там	44	Берег левый—берег правый	130
Растительный мир и строительство	46	Кипит не только жидкость	135
«Как с гуся вода»	50	Песочные часы	137
Удивительное непостоянство	54	Слеживание	144
Адгезионная прочность	61	Созидание через разрушение	148
ПРИЧИНЫ АДГЕЗИИ		Электростатическая сальфетка	151
Притяжение разноименных	64	Электрофотография	156
Зеркальное отображение	70	Плавающая иголка	159
По аналогии с конденсатором	73	От смазки...	165
		...до плазмы	169
		Вместо эпилога: основные сведения об адгезии	173



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«НАУКА»
ГОТОВИТСЯ
К ПЕЧАТИ
КНИГА:**

ШУБИН В. Н., БРУСЕНЦОВА С. А.
Радиация против загрязнения.
10 л. — 65 к.

В книге впервые популярно освещается одна из важнейших проблем современной науки — очистка воды радиационными методами. Описываются существующие методы радиационной очистки загрязненных вод, рассматриваются преимущества и недостатки каждого из них в применении к различным случаям загрязнения воды (природные воды, промышленные стоки, стоки животноводческих комплексов).

Авторы книги — известные специалисты в области радиационных излучений.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов «Книга-почтой» «Академкнига»:

480091 **Алма-Ата**, 91, ул. Фурманова, 91/97; 370005 **Баку**, 5, ул. Джапаридзе, 13; 320093 **Днепропетровск**, проспект Ю. Гагарина, 24; 734001 **Душанбе**, проспект Ленина, 95; 252030 **Киев**, ул. Пирогова, 4; 277012 **Кишинев**, проспект Ленина, 148; 443002 **Куйбышев**, проспект Ленина, 2; 197345 **Ленинград**, Петрозаводская ул., 7; 220012 **Минск**, Ленинский проспект, 72; 117192 **Москва**, В-192, Мичуринский проспект, 12; 630090 **Новосибирск**, Академгородок, Морской проспект, 22; 620151 **Свердловск**, ул. Мамина-Сибиряка, 137; 700187 **Ташкент**, ул. Дружбы народов, 6; 450059 **Уфа**, 59, ул. Р. Зорге, 10; 720001 **Фрунзе**, бульвар Дзержинского, 42; 310078 **Харьков**, ул. Чернышевского, 87.