

## УЧЕТ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАСКЛИНИВАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ РЕЗКИ СТЕКЛА

**П. А. ХИЛО, И. И. ЗЛОТНИКОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

В настоящее время основной способ резки листового стекла заключается в нанесении на его поверхность твердосплавным роликом линии реза с последующим разделением на листы вдоль этой линии путем отломки.

Из литературных источников известно, что в процессе резки стекла твердосплавным инструментом под режущим роликом, образуется система трещин, состоящая из центральной (медианной) и двух боковых трещин [1], [2]. От вида, расположения и размера этих трещин и зависит качество резки стекла. Типичный вид трещин, образующихся под режущим роликом с углом заточки  $140^\circ$ , приведен на рис. 1 [2].

Главными факторами, влияющими на процесс резки стекла и его результативность, являются величина нагрузки на режущий ролик, а также наличие и качество расклинивающей жидкости.



*Рис. 1. Вид трещин, образующихся в стекле под режущим роликом ( $\times 25$ )*

Проникая в магистральную трещину, наносимую режущим инструментом на поверхность стекла, жидкость создает в ней расклинивающее давление – эффект Ребиндера [3]. Суть этого явления заключается в первую очередь в том, что молекулы технологической жидкости, обладающей высокой смачивающей способностью по отношению к твердой поверхности, достигая зон, где ширина микротрещины сравнима с размером молекулы, своим давлением стремятся расклинить эту трещину, преодолевая силы межмолекулярного притяжения между вновь образующимися поверхностями стекла для дальнейшего продвижения и снижения их поверхностной энергии. Из этого следует, что для эффективного действия расклинивающая жидкость должна обладать не только высокой смачивающей способностью по отношению к стеклу, но и снижать силы молекулярного взаимодействия вновь образующихся поверхностей стекла.

### **О механизме межмолекулярного взаимодействия конденсированных тел**

Наиболее общим способом расчета молекулярных сил взаимодействия двух твердых поверхностей является флуктуационная электромагнитная теория Е. М. Лифшица, развитая

в работах [4], [5]. С помощью квантовой теории поля получено общее выражение для силы  $F$ , действующей на единицу площади каждого из двух конденсированных тел, которые разделены зазором шириной  $l$ , заполненным третьей средой.

Формулы, приведенные в этих работах сложны, хотя, в принципе, современные методы вычислительной техники позволяют рассчитать силу  $F$  без каких-либо упрощений, если известны зависимости диэлектрических проницаемостей рассматриваемых веществ  $\varepsilon_{1,2,3}(i\xi)$  от мнимой частоты. Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon(i\xi)$  связана с мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon''(\omega)$  соотношением Крамерса-Кронига [4], [5]:

$$\varepsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon''(\omega)\omega}{\omega^2 + \xi^2} d\omega.$$

Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости определяет потери энергии электромагнитным полем при его прохождении через вещество. Она связана с показателем преломления  $n$  и коэффициентом поглощения среды  $k$  посредством соотношения  $\sqrt{\varepsilon} = n + ik$  и определяется из соответствующих спектров поглощения, которые в свою очередь определяют природу материала, его химический состав, молекулярное строение и т. д. Таким образом, функции  $\varepsilon''(\omega)$  являются достаточно полными характеристиками твердых тел, которые определяют молекулярное притяжение между ними. Однако эти аналитические зависимости плохо известны для большинства материалов. Поэтому для прогнозирования взаимодействия между телами используют различные приближенные формулы.

Когда зазор между телами  $l$  мал по сравнению с длинами волн  $\lambda$ , характерными для спектров поглощения взаимодействующих тел (нет запаздывания электромагнитных волн), и температуры малы, т. е. выполняется условие  $\frac{lkT}{\hbar c} \ll 1$ , формула для силы взаимодействия, согласно данной теории имеет вид [4]:

$$F(l) = \frac{\hbar}{16\pi^2 l^3} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} x^2 \left[ \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)} e^x - 1 \right]^{-1} dx d\xi,$$

где  $\varepsilon_{1,2,3} = \varepsilon_{1,2,3}(i\xi)$ .

Эта формула может быть еще упрощена с достаточной степенью точности пренебрежением единицы в знаменателе. Тогда после интегрирования по  $x$  получим:

$$F(l) = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \int_0^{\infty} \frac{[\varepsilon_1(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)][\varepsilon_2(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)]}{[\varepsilon_1(i\xi) + \varepsilon_3(i\xi)][\varepsilon_2(i\xi) + \varepsilon_3(i\xi)]} d\xi.$$

Однако, как отмечалось выше, зависимости  $\varepsilon_{1,2,3}(i\xi)$  плохо известны для большинства материалов. Поэтому в монографии [6] были получены приближенные формулы для расчета ван-дер-ваальсовых сил, действующих между двумя телами, разделенными зазором  $l$ , заполненным жидкостью, в которых принимается во внимание поглощение только в области оптических частот (видимая и/или ближайшие ультрафиолетовая и инфракрасная области спектра). Такое упрощение практически оправдано, так как большинство диэлектриков и органические жидкости, применяемые в качестве компонентов расклинивающих жидкостей наиболее сильно поглощают в ближней ультрафиолетовой области. Это же относится и к стеклу, интенсивно поглощающему ультрафиолетовые лучи с  $\lambda < 350$  нм и практически полностью прозрачному в остальном оптическом диапазоне.

Если принять во внимание только сильное поглощение в оптическом (в том числе ультрафиолетовом) диапазоне частот, то можно получить формулу, удобную для практического применения [6]:

$$F(l) = \frac{\hbar}{16\pi l^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0 (\varepsilon_{10} - \varepsilon_{30})(\varepsilon_{20} - \varepsilon_{30})}{(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30})^{1/2} (\varepsilon_{20} + \varepsilon_{30})^{1/2} [(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30})^{1/2} + (\varepsilon_{20} + \varepsilon_{30})^{1/2}]^2}$$

где  $\omega_0$  – главная частота поглощения всех трех диэлектриков;  $\varepsilon_{10}$ ,  $\varepsilon_{20}$  – статические диэлектрические постоянные двух твердых тел;  $\varepsilon_{30}$  – диэлектрическая постоянная пленки. Из этой формулы следует, что если  $\varepsilon_{20} > \varepsilon_{30} > \varepsilon_{10}$  или  $\varepsilon_{10} > \varepsilon_{30} > \varepsilon_{20}$ , то сила взаимодействия станет отрицательной, т. е. может иметь место не притяжение, а отталкивание контактирующих тел.

В работе [6] рекомендуется при расчетах вместо статических значений диэлектрических постоянных использовать их значения в рассматриваемом оптическом диапазоне  $\varepsilon = n^2$ . С учетом этого получено выражение:

$$F(l) = \frac{\hbar}{16\pi l^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0 (n_1^2 - n_3^2)(n_2^2 - n_3^2)}{(n_1^2 + n_3^2)^{1/2} (n_2^2 + n_3^2)^{1/2} [(n_1^2 + n_3^2)^{1/2} + (n_2^2 + n_3^2)^{1/2}]^2}$$

где  $n_{1,2,3}$  – показатели преломления соответствующих диэлектриков на частоте  $\omega_0$ .

### Применение теории молекулярного взаимодействия к анализу поведения расклинивающей жидкости в магистральной трещине

При резке стекла оба взаимодействующих твердых тела одинаковы, поэтому последняя формула принимает вид:

$$F(l) = \frac{\hbar}{32\pi l^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0 (n_1^2 - n_3^2)^2}{(n_1^2 + n_3^2)^{3/2}}$$

где  $n_1$  – показатель преломления стекла;  $n_3$  – показатель преломления расклинивающей жидкости в области рассматриваемых частот поглощения.

Как следует из полученной формулы, получить отрицательную силу, т. е. отталкивание невозможно ни при каких значениях показателей преломления  $n_{1,3}$ . Однако эту силу можно сделать очень малой, если обеспечить условие  $n_1 = n_3$ . Рассмотрим конкретные примеры. В табл. 1 приведены коэффициенты преломления  $n$  стекла и некоторых жидкостей.

Таблица 1

Коэффициенты поглощения веществ при температуре 20 °С

Вещество	Длина волны, $\lambda$ , нм	Показатель преломления
Стекло листовое	589,3	1,464
Стекло листовое	404,7	1,482
Стекло листовое	303,4	1,512

Окончание табл. 1

Вещество	Длина волны, $\lambda$ , нм	Показатель преломления
Вода	589,3	1,333
Вода	404,7	1,343
Ацетон	589,3	1,359
Этиловый спирт	589,3	1,361
Гексан	589,3	1,375
Бензол	589,3	1,501

Скипидар	589,3	1,482
Масло льняное	589,3	1,483
Масло минеральное	589,3	1,515
Масло силиконовое	589,3	1,442
Сольвент	589,3	1,502
Жидкости для резки стекла серии АЦЕКАТ	589,3	1,461–1,485

Хотя приведенные показатели преломления веществ определены в основном для  $\lambda = 589,3$  нм (желтая *D*-линия спектра излучения натрия), т. е. сравнительно далеко от ультрафиолетовой области, но даже с учетом дисперсии из сравнения приведенных данных можно сделать некоторые выводы.

Такие полярные жидкости, как вода, ацетон и этиловый спирт, а также гексан (неполярная жидкость) не могут найти применение в качестве основы расклинивающей жидкости для резки стекла, так как у них показатель преломления значительно ниже, чем у стекла. В то же время бензол, сольвент, скипидар, многие растительные, минеральные и силиконовые масла пригодны с точки зрения рассмотренной выше теории в качестве основы или компонентов жидкостей для резки стекла. Сделанные выводы подтверждает тот факт, что показатель преломления специальных жидкостей для резки стекла серии АЦЕКАТ (Германия), согласно фирменному сертификату лежит в том же интервале, что и показатель преломления большинства сортов листового технического стекла. Состав указанных жидкостей включает смесь различных углеводородов и поверхностно-активных веществ. Более точный состав жидкостей является ноу-хау фирмы-изготовителя.

Проведенные теоретические предпосылки послужили основой для разработки состава новой расклинивающей жидкости резки стекла.

#### **Разработка состава расклинивающей жидкости**

В качестве объектов исследования были испытаны: сольвент нефтяной, бензол каменноугольный, минеральное масло марки И-12А, скипидар живичный, а также силиконовое масло – полисилоксановая жидкость марки ПМС-100. Испытания жидкостей проводили в сравнении с жидкостью для резки стекла Ацекат-5503 (Германия). Эффективность действия расклинивающих жидкостей на процесс резки стекла оценивали по усилию разлома плоского стеклянного образца по линии надреза. Для этого на поверхность прямоугольного образца стекла размером  $20 \times 60$  мм и толщиной 4 мм наносили поперечную линию реза твердосплавным роликом с углом заточки  $140^\circ$  при нагрузке на ролик 10–60 Н. Дорожку, вдоль которой наносился надрез, предварительно обильно смазывали исследуемой расклинивающей жидкостью. Образец с нанесенным надрезом подвергали испытанию на двухупорный изгиб. Параметры испытания: расстояние между опорами – 40 мм, скорость нагружения – 5 мм/мин.

Влияние различных жидкостей на усилие разлома стеклянных образцов иллюстрирует приведенная на рис. 2 диаграмма.

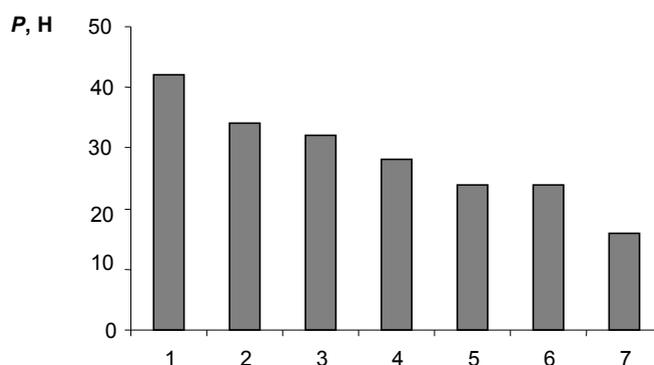


Рис. 2. Зависимость усилия разлома стекла  $P$  от типа расклинивающей жидкости: 1 – без жидкости; 2 – масло И-12А; 3 – бензол, 4 – скипидар; 5 – жидкость ПМС-100; 6 – сольвент; 7 – Ацекат-5503

Как следует из приведенных на рис. 2 данных, наилучший расклинивающий эффект из выбранных индивидуальных жидкостей обеспечивает жидкость ПМС-100 и сольвент; близок к ним по расклинивающему действию и скипидар.

На основании проведенных предварительных испытаний для дальнейших исследований были выбраны жидкости: сольвент, полисилоксановая жидкость ПМС-100 и скипидар. Для улучшения смазывания режущего ролика в состав вводили минеральное масло. Были испытаны различные комбинации отобранных жидкостей, составы которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Составы жидкости для резки стекла, мас. %

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
Жидкость марки ПМС-100	8	10	12	14	16	16	18	20
Минеральное масло И-12А	32	30	25	20	20	18	12	10
Скипидар живичный	–	–	–	–	15	15	–	–
Сольвент нефтяной	60	60	63	66	49	51	70	70

Данные об эффективности исследуемых жидкостей приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные свойства жидкостей для резки стекла

Показатель	1	2	3	4	5	6	7	8	Ацекат 5503
Усилие разлома стекла, Н, при нагрузке на ролик, Н:									
– 50	48	46	44	41	36	37	40	44	36
– 60	33	32	32	29	23	25	31	34	22

Из приведенных данных следует, что взяв за основу разрабатываемой жидкости сольвент с добавлением в его состав силиконового и минерального масла, можно получить расклинивающую жидкость с весьма высокими свойствами. Еще большего снижения усилия разлома стекла при его резке удалось достичь дополнительным введением скипидара. Жидкость для резки стекла изготавливали путем последовательного растворения компонентов в сольвенте. В результате проведенных работ была получена технологическую жидкость, эффективность которой при резке стекла практически не уступает зарубежному аналогу Ацекат 5503 [7].

### Заключение

Таким образом, привлечение общей флуктуационной электромагнитной теории ван-дер-ваальсовых сил для расчета силы молекулярного взаимодействия двух твердых поверхностей позволяет теоретически проанализировать поведение расклинивающей жидкости в магистральной трещине, образующейся при резке стекла. Исходя из предположения, что зазор между поверхностями стекла в магистральной трещине мал по сравнению с длинами волн, характерными для спектров поглощения взаимодействующих тел, а поглощение происходит в узкой полосе частот, характерной как для стекла, так и для расклинивающей жидкости, может быть получена простая формула для расчета силы взаимодействия, удобная для практического применения. Основными параметрами, определяющими силу взаимодействия являются показатели преломления стекла и

расклинивающей жидкости в области рассматриваемых частот поглощения. Применение этой формулы даже при принятых допущениях и приближениях позволяет указать пути снижения силы притяжения между образующимися при резке поверхностями стекла. Для этого необходимо выбрать жидкость с показателем преломления наиболее близким к показателю преломления данного сорта стекла. С учетом этого результата была получена технологическую жидкость, эффективность которой при резке стекла практически не уступает зарубежным аналогам. В дальнейшем целесообразно развивать исследования направленные на отыскание более точных, а не приближенных аналитических зависимостей, связывающих диэлектрические и оптические свойства стекол и жидкостей с силой их межмолекулярного взаимодействия.

### **Литература**

1. Копчекин, Л. Г. Зарождение и распространение трещин в стекле под режущим роликом / Л. Г. Копчекин, Л. А. Шитова // *Стекло и керамика*. – 1996. – № 4. – С. 11–13.
2. Копчекин, Л. Г. Зависимость глубины трещины от скорости резки стекла / Л. Г. Копчекин, Л. А. Шитова // *Стекло и керамика*. – 1999. – № 8. – С. 6–8.
3. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в твердых телах в процессах из деформации и разрушения / П. А. Ребиндер, Е. Д. Щукин // *Успехи физ. наук*. – 1972. – Т. 108, вып. 1. – С. 3–42.
4. Дзялошинский, И. Е. Общая теория ван-дер-ваальсовых сил / И. Е. Дзялошинский, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский // *Успехи физ. наук*. – 1961. – Т. 73, вып. 3. – С. 381–422.
5. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1982. – 624 с.
6. Israelichvili, J. N. Intermolecular and Surface Forces / J. N. Israelichvili. – London : Academic Press, 1991. – 450 с.
7. Жидкость для резки стекла : пат. 11485 Респ. Беларусь, МПК С 03В 33/00 / П. Д. Петрашенко, И. И. Злотников, П. А. Хило, Ю. П. Петрашенко // *Афіцыйны бюл.* – 2008. – № 6.

*Получено 17.11.2011 г.*