

УДК 541.64:536.7

## МЕХАНИЗМ РАССЛОЕНИЯ В МУЛЬТИСЛОЙСТЫХ КОМПОЗИТАХ ПОЛИКАРБОНАТ-СТИРОЛ-АКРИЛОНИТРИЛЬНЫЙ СОПОЛИМЕР

© 1994 г. С. Л. Баженов\*, К. Селитти\*\*, А. Хилтнер\*\*, Э. Баер\*\*

\*Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук  
117977 Москва, ул. Косякова, 4

\*\*Факультет макромолекулярных наук, Университет Кейз Вестерн Резерв  
Кливленд, Огайо, 44106, США

Поступила в редакцию 03.03.93 г.

Методом двухконсольной балки исследован механизм расслоения полимерного композита, состоящего из 194 чередующихся слоев пластичного поликарбоната и более хрупкого стирол-акрилонитрильного сополимера. Расслоение носило преимущественно когезионный характер, и трещина росла через крейзы в слоях стирол-акрилонитрильного сополимера. Наблюдались два несколько различающихся механизма расслоения. При первом механизме трещина росла через единственный слой стирол-акрилонитрильного сополимера, в то время как при втором она иногда перескакивала к соседнему слою. Выведено уравнение, позволяющее определить межслоевую вязкость разрушения при различающейся толщине консолей двухконсольной балки. Уравнение может быть использовано как при слабом, так и при сильном изгибе консолей. Разработан основанный на этом уравнении метод определения вязкости разрушения посредством измерения угла изгиба концов консолей. Если расслоение сопровождалось пересоком трещины между соседними слоями стирол-акрилонитрильного сополимера, то трещина пересекала слой пластичного поликарбоната, и вязкость разрушения возрастила.

### ВВЕДЕНИЕ

Метод получения микрослоистых полимерных материалов путем экструзии позволяет получать за одну технологическую стадию композиты, состоящие из множества полимерных слоев (плёнок). Обычно количество слоев в таких композитах варьируется от 50 до нескольких тысяч [1, 2]. Соответственно толщина слоев в зависимости от их количества варьируется от долей микрона до нескольких десятков микрон. Мультислоистые композиты могут изготавливаться из двух или трех различных полимеров, однако обычно они делаются из двух полимеров А и Б с последовательностью слоев АБАБАБ. Уникальные оптические свойства таких мультислоистых композитов, как полипропилен-полистирол и поликарбонат-полиметилметакрилат, были описаны ранее [3, 4].

Механические свойства мультислоистого композита, в котором пластичный ПК с разрывным удлинением 100 - 110% перемежается слоями значительно более хрупкого стирол-акрилонитрильного сополимера (САН) с разрывным удлинением не выше 5%, описаны в работах [5 - 7]. При растяжении и при ударном испытании наблюдалась переход от хрупкого разрушения к пластичному при увеличении доли ПК [7]. Неупругое деформирование было характерно как для слоев ПК, так и для слоев САН, причем механизмы необратимой деформации в этих материалах отличались. Слои ПК деформировались сдвигом по

микрополосам скольжения, а в слоях САН наблюдалось образование крейзов (трещин серебра), характерной чертой которых является наличие волокон диаметром 0.01 - 0.1 мкм между берегами крейза.

Адгезионную прочность между слоями ПК и САН измеряли методом фанерного сдвига в модельной системе, состоящей из трех слоев, двух внешних слоев ПК и слоя САН между ними [8]. При варьировании концентрации акрилонитрильных (АН) групп в САН наблюдали довольно резкий максимум адгезионной прочности при концентрации АН, равной 25 - 27%. Межслоевую адгезию и механизм расслоения в реальных мультислоистых композитах ранее не исследовали.

Адгезия обычно характеризуется адгезионной прочностью, измеренной при растяжении по-перек плоскости слоев или при сдвиге. К сожалению, для полимерных мультислоистых композитов воспользоваться этими методами практически невозможно из-за малой толщины пластин (1 - 1.5 мм). В последнее время для описания межслоевых характеристик волокнистых композитов широко используется метод двухконсольной балки (ДКБ) [9 - 14]. Основными достоинствами этого метода являются простота испытания образцов, а также ясный физический смысл измеряемой величины - вязкости разрушения. При использовании метода ДКБ сила расслоения обычно не является характеристикой материала, поскольку она снижается при увеличении длины

трещины. Межслоевые характеристики при этом описываются вязкостью разрушения, т.е. энергией, рассеиваемой при образовании новой поверхности. Чем выше вязкость расслоения, тем выше стойкость композита к расслаиванию.

Одно из условий, при котором может использоваться стандартный метод ДКБ – слабый изгиб консолей. Это предположение выполняется, если испытываемая пластина достаточно толста. В случае тонких и низкомодульных пластин, какими являются мультислоистые композиты ПК–САН, изгибом консолей пренебречь нельзя. Случай сильного изгиба консолей применительно к методу ДКБ теоретически рассмотрен в работе [13]. Результаты этой работы использованы для анализа роли изгиба консолей в работе [14].

Показано, что степень изгиба может быть охарактеризована углом изгиба консолей в точке приложения нагрузки. Если угол изгиба меньше  $18^\circ$ , то изгиб консолей является слабым, и для определения вязкости разрушения можно использовать стандартный метод ДКБ. В этом случае критическая нагрузка снижается при увеличении длины трещины в процессе испытания. Напротив, если изгиб консолей предельно силен и угол изгиба превышает  $72^\circ$ , критическая нагрузка в процессе разрушения остается постоянной и является характеристикой материала. Для определения межслоевой вязкости разрушения  $G_{Ic}$  наиболее удобен именно этот случай, поскольку он требует измерения лишь ширины образца и силы расслоения. Для волокнистых стеклопластиков полученное этим методом значение вязкости разрушения отличается от значений, полученных традиционным методом ДКБ не более чем на 15% [15]. К сожалению, для ряда материалов не может быть использован ни традиционный метод ДКБ, ни случай предельно сильного изгиба. В промежуточном случае, когда угол изгиба выше  $18^\circ$ , но ниже  $72^\circ$ , изгибом нельзя пренебречь, с одной стороны, и критическая сила снижается при расслоении – с другой. В данном случае метод ДКБ необходимо модифицировать. При исследовании расслоения стеклопластика это было сделано путем прямого измерения плеча расслаивающей силы [14]. Такое решение проблемы изгиба в методе ДКБ корректно с теоретической точки зрения, однако весьма неудобно экспериментально. Поэтому при исследовании мультислоистых композитов весьма желательно было бы найти альтернативное решение проблемы сильного изгиба консолей.

Цель настоящей работы – исследование механизма расслоения композита, состоящего из 194 слоев поликарбоната и САН, а также разработка метода определения вязкости разрушения путем измерения угла изгиба двухконсольной балки.

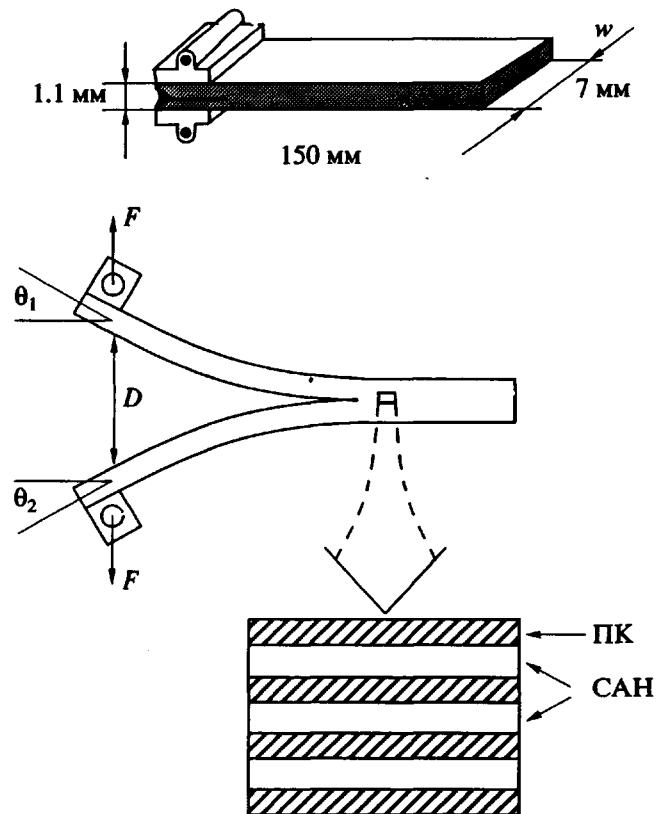


Рис. 1. Схема метода двухконсольной балки:  $F$  – сила,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы изгиба первой и второй консолей,  $D$  – прогиб консолей,  $w$  – ширина образца.

## ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Мультислоистый композит фирмы “Дау Кэмикал” в форме пластин толщиной 1.1 мм состоял из 194 чередующихся слоев ПК и САН при массовом отношении ПК : САН = 26 : 74. Для получения композита использовался ПК марки “Мерлон М-40” фирмы “Мобэй Кэмикал” (Питтсбург, Пенсильвания) и САН марки “Тутил 867-1В” фирмы “Дау Кэмикал” (Мидланд, Мичиган). Для обеспечения максимальной адгезии между слоями САН содержал 25 мас. % акрилонитрильного сополимера.

## ОБРАЗЦЫ

Длина, ширина и толщина образцов составляли 150, ~7 и 1.1 мм соответственно (рис. 1). Исходную трещину наносили при помощи алмазного диска на машине “Isomet” параллельно плоскости слоев, по возможности ближе к середине образца. После этого образцы расщепляли с помощью бритвы в жидком азоте, поскольку в этом случае расслоение являлось адгезионным и трещина росла преимущественно вдоль одной границы раздела. Длину сделанного таким образом надреза варьировали в пределах от 10 до 20 мм.

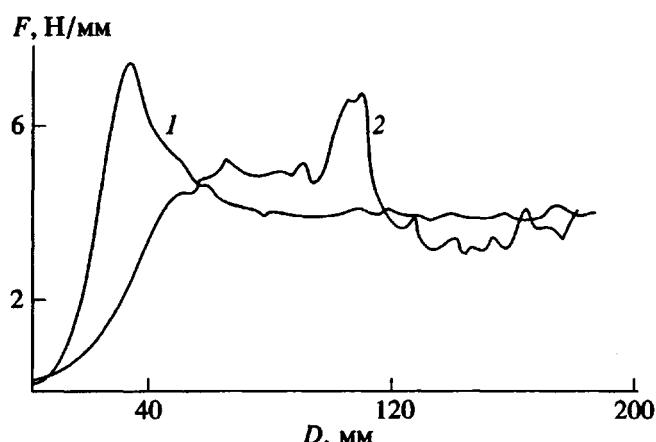


Рис. 2. Диаграмма нагрузления (сила–прогиб) при первом (1) и втором механизме расслоения (2). Сила приведена в расчете на ширину образца.

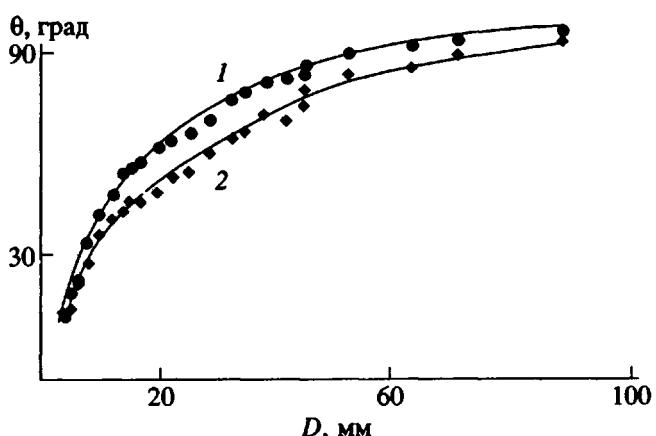


Рис. 3. Зависимость угла изгиба консолей  $\theta$  от прогиба  $D$ . 1 и 2 – первая и вторая консоль соответственно.

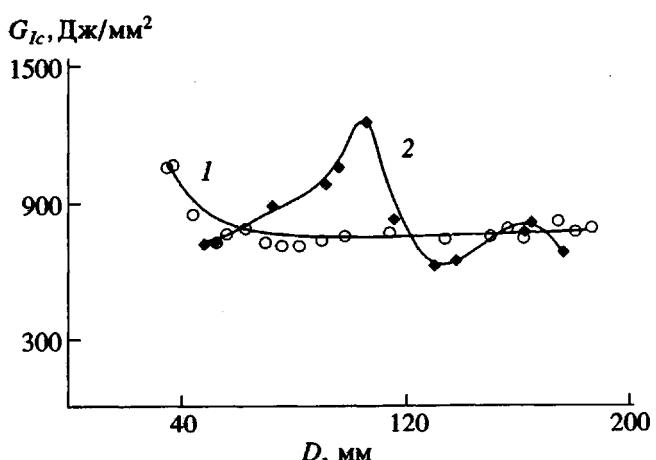


Рис. 4. Зависимость вязкости разрушения  $G_{Ic}$  от прогиба  $D$ . 1 и 2 – первый и второй механизм расслоения соответственно.

Для нагружения к концам консолей приклеивали легкие наконечники, как показано на рис. 1. Механические испытания производили на машине "Инстрон" при скорости нагружения 2 мм/мин. Всего испытано восемь образцов. Результаты испытаний усредняли.

После испытания обе образовавшиеся поверхности разрушения изучали при помощи оптического микроскопа и электронного сканирующего микроскопа "Jeol LSM 840A". В дополнение образцы разрезали параллельно плоскости боковой поверхности. После шлифовки кончик трещины рассматривали при помощи оптического и электронного микроскопов. Перед использованием электронного микроскопа образец покрывали слоем золота толщиной 60 Å.

ИК-спектры поверхностей разрушения исследовали при помощи ИК-спектрометра полного внутреннего отражения "Nicolet-800". Для повышения разрешающей способности спектрометр был оснащен компьютером. Положение максимума ИК-пика поглощения определяли из условия равенства нулю его второй производной.

### МЕЖСЛОЕВАЯ ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ $G_{Ic}$

При общей толщине образца 1.1 мм и количестве слоев 194 надрезать образец точно посередине практически невозможно. В результате толщина консолей была несколько различной, а их изгиб – несимметричным. Задача теории упругости определения вязкости разрушения при различной толщине консолей в предположении сильного изгиба решена в приложении

$$G_{Ic} = F_c (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) / w, \quad (1)$$

где  $F_c$  – сила, при которой начинается движение трещины,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы изгиба первой и второй консолей соответственно,  $w$  – ширина образца.

Чтобы определить углы изгиба  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , в процессе расслоения образца его периодически фотографировали с помощью фотоаппарата "Nikon F3".

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Образцы, которые изначально представлялись совершенно одинаковыми, расслаивались по двум механизмам. Хотя эти механизмы имеют много общего, между ними имеется также и существенное различие. Первый механизм расслоения наблюдали в двух образцах (из восьми).

На рис. 2 приведена кривая нагружения (сила–прогиб) для первого механизма расслоения (кривая 1), на которой могут быть отмечены три различные области. Вначале при малом прогибе (расстоянии между захватами)  $D$  сила возрастает. Трещина при этом не двигается и происходит упругое нагружение (изгиб) консолей. При неко-

торой нагрузке трещина трогается, после чего нагрузка начинает снижаться, приводя к появлению максимума. На последней, третьей части кривой сила перестает снижаться и становится практически константой. В этой области наблюдаются небольшие флюктуации нагрузки, амплитуда которых не превышает 15%.

Диаграмма нагружения для второго механизма расслоения представлена кривой 2. Основное отличие от кривой 1 заключается в наличии весьма значительных и нерегулярных колебаний нагрузки, амплитуда которых достигает 100% (от 3 до 6 Н/мм).

Типичная зависимость угла изгиба от смещения захватов представлена на рис. 3. Поскольку зависимости были практически одинаковы для обоих механизмов расслоения, на рис. 3 приведена только одна зависимость. Она относится к образцу, расслоившемуся по первому механизму. Углы изгиба для первой и второй консолей не равны, что, видимо, является следствием некоторого различия их толщины. Наблюдается монотонное возрастание углов изгиба, причем при смещении  $D > 50$  мм углы становятся выше  $72^\circ$ . Если вязкость разрушения является константой материала, то при таких значениях угла изгиба критическая сила должна оставаться неизменной [14]. Это предсказание теории упругости согласуется с экспериментом при первом механизме расслоения (рис. 3, кривая 1). При втором механизме разрушения наблюдаются сильные колебания критической силы и вязкости разрушения.

Зависимость определенной согласно уравнению (1) вязкости разрушения от смещения захватов приведена на рис. 4. При первом механизме разрушения  $G_{Ic}$  является практически константой везде, кроме небольшого начального участка. Величина вязкости разрушения ( $675$  Дж/м<sup>2</sup>) незначительно отличается от вязкости разрушения чистого ПС ( $400$  Дж/м<sup>2</sup>) [15], которая предположительно близка к вязкости разрушения САН. При втором механизме разрушения зависимость  $G_{Ic}$  от  $D$  отражает поведение критической нагрузки и наблюдаются существенные колебания этой величины. Следовательно, при втором механизме разрушения  $G_{Ic}$  не является характеристикой материала. Кроме того, в этом случае средние значения вязкости разрушения оказываются заметно выше, чем при первом механизме расслоения.

### МИКРОСКОПИЯ

На рис. 5а показан кончик трещины для образца, в котором расслаивающая сила не имела сильных флюктуаций; изображение получено в той же плоскости, что и на рис. 1. На фотографии отчетливо видна слоистая структура материала. Трещина распространяется через более толстый слой, т.е. через слой САН. Перед кончиком трещины наблюдаются множество относительно ко-

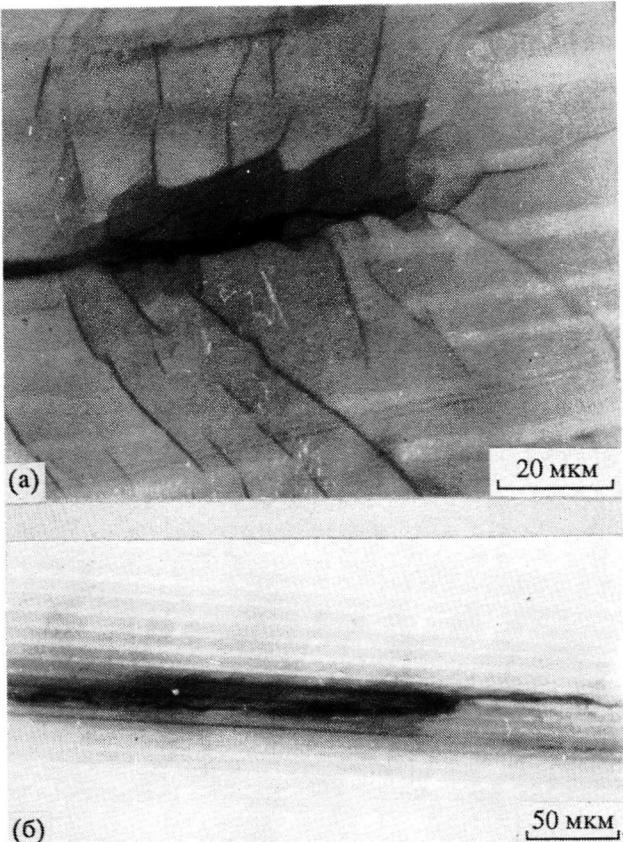


Рис. 5. Оптическая фотография кончика трещины для первого (а) и второго (б) механизмов расслоения. Изображение получено в плоскости, соответствующей рис. 1 (вид сбоку). Направление роста трещины слева направо.

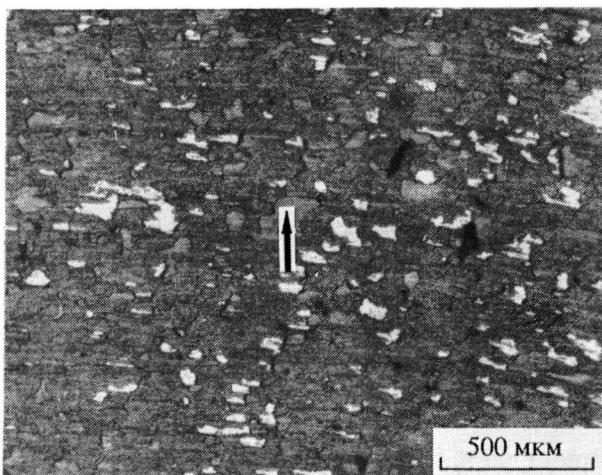
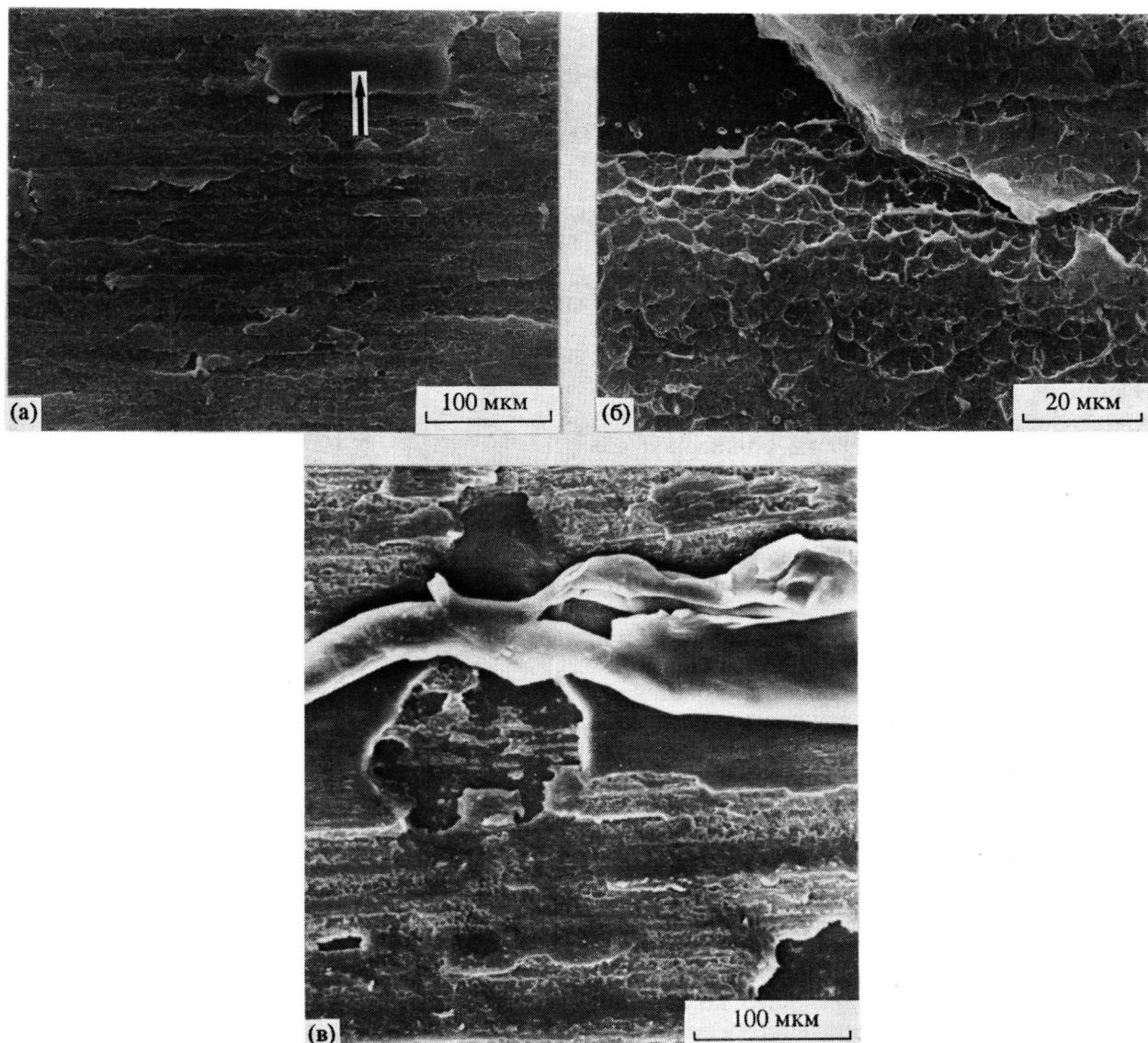


Рис. 6. Оптическая фотография поверхности разрушения (вид сверху на рис. 1). Направление роста трещины снизу вверх. Стрелка показывает поверхность слоя САН после локально адгезионного разрушения. Светлые области представляют поверхность ПК после адгезионного расслоения.



**Рис. 7.** Электронная фотография поверхности разрушения. Направление роста трещины снизу вверх. В правом верхнем углу фрагмента а видна поверхность слоя САН после адгезионного расслоения. В левом верхнем углу фрагмента б видна поверхность слоя ПК (соответствует светлым областям на оптической фотографии рис. 6); в – скачок трещины через слой ПК.

ротких крейзов (длиной от 5 до 10 мкм), появление которых характерно для разрушения чистого САН при растяжении. Трещина распространяется скачками через эти крейзы. Таким образом, расслоение является когезионным через слой САН. Это означает, что адгезия между слоями САН и ПК столь хороша, что адгезионная прочность превышает напряжение крейзообразования в САН. Следует также отметить, что крейзы появляются не только в слое САН, через который происходит рост трещины, но также и в соседних слоях. В кончике трещины наблюдается появление крейзов, ориентированных под некоторым углом к плоскости трещины и выстроенных в одну линию. Возможно, эти крейзы расположены под углом к пло-

скости трещины вследствие наличия изгибающих напряжений в кончике трещины.

На рис. 5б показан кончик трещины при втором механизме расслоения. В этом случае наблюдаются скачки трещины к соседним слоям САН (при первом механизме трещина всегда росла через один слой). Таким образом, различие между двумя механизмами расслоения состоит в наличии или отсутствии скачков трещины между соседними слоями САН. При скачке трещина вынуждена пересечь слой ПК, разделяющий слои САН. Поскольку ПК является очень пластичным материалом, вязкость разрушения при этом возрастает. Таким образом, флюктуации в вязкости

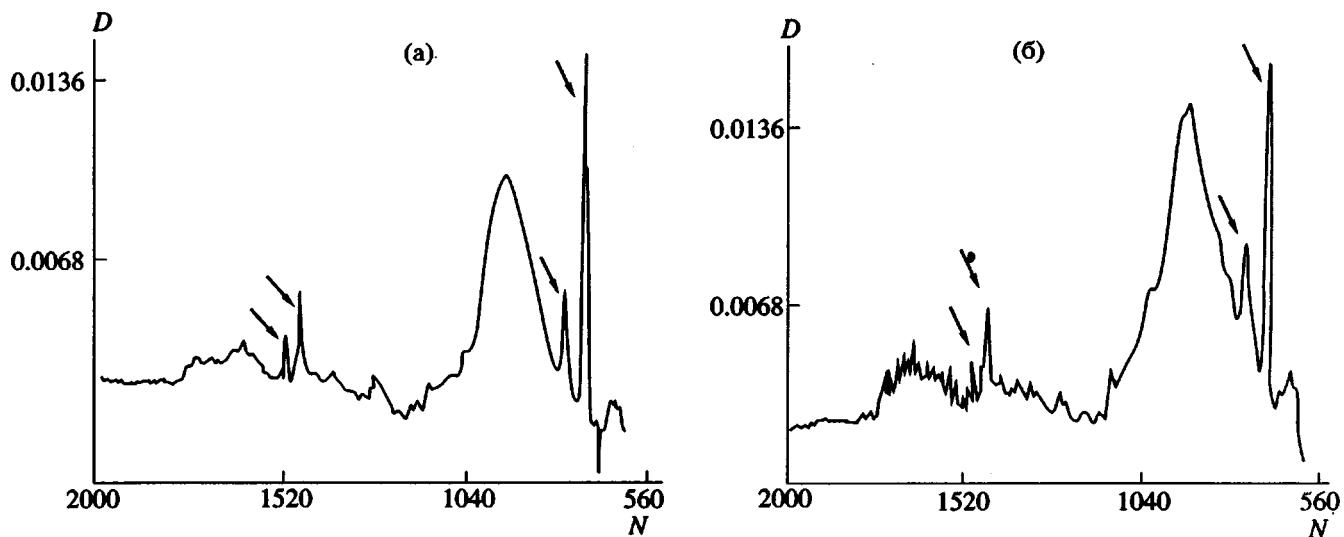


Рис. 8. ИК-спектры поверхностей разрушения.  $D$  – оптическая плотность,  $N$  – волновое число. Стрелками отмечены пики поглощения САН. Пояснения в тексте.

расслоения обусловлены вкладом ПК в вязкость композита.

На рис. 6 приведена оптическая фотография поверхности разрушения в случае, когда скачки трещин отсутствуют. На поверхности разрушения есть области, имеющие три различных уровня яркости изображения. Большая часть поверхности разрушения темного цвета. Очевидно, эта часть поверхности образована при прохождении трещины через крейз в слое САН.

На поверхности разрушения видны также небольшие светлые и небольшие серые области. По яркости серые области лишь немногим светлее, чем поверхность крейза (одна из серых областей отмечена стрелкой). Один из основных приемов фрактографии заключается в изучении обеих поверхностей разрушения. В данном случае этот прием показал, что темным крупным областям на одной поверхности соответствуют точно такие же темные области на второй поверхности. Такой результат очевиден, поскольку обе поверхности разрушения представляют поверхность крейза. В то же время белым областям на одной поверхности соответствуют серые области на второй и наоборот. На основании этого наблюдения можно предположить, что белые и серые области образованы в результате локального адгезионного расслоения между слоями ПК и САН. Если две близкие области находятся по высоте на различном уровне, то оптический микроскоп позволяет определить, какая из областей находится выше (при различной высоте областей одна из них оказывается не в фокусе). Этот прием показал, что белые области находятся ниже, а серые – выше уровня крейза в САН. Следовательно, белые области являются поверхностью слоя ПК после локального адгезионного расслоения, а серые

области – поверхностью САН. Для подтверждения этих выводов поверхность разрушения изучали также при помощи электронного микроскопа.

На рис. 7а и 7б приведены электронные фотографии поверхности разрушения, показывающие эту поверхность при более высоких степенях увеличения. Большая часть поверхности разрушения на рис. 7а типична для медленного распространения трещины через крейз в САН. На поверхности крейза можно заметить линейную текстуру, ориентированную перпендикулярно направлению роста трещины. Расстояние между этими линиями равно 4 - 10 мкм, что близко к длине крейзов на рис. 5а. Таким образом, линейная структура образована в результате роста трещины через различные крейзы длиной 4 - 10 мкм, причем этот рост, видимо, является скачкообразным. Поверхность крейза очень неровная и состоит из большого количества параболических областей размером порядка нескольких микрон (рис. 7б), ориентированных преимущественно в направлении роста трещины. Вследствие своей неровности поверхность крейза рассеивает свет, и в просвечивающем оптическом микроскопе выглядит темнее, чем области с адгезионным разрушением.

Помимо поверхности крейзов на фотографиях наблюдаются области с адгезионным расслоением. Эти области существенно более ровные и не имеют характерной текстуры крейза. Естественно, что ниже уровня крейза находится поверхность слоя ПК (темная область в левом верхнем углу на рис. 7б), а выше уровня крейза – поверхность слоя САН (отмечено стрелкой на рис. 7а). Таким образом, фрактографический анализ показывает, что механизм расслоения смешанный, ко-

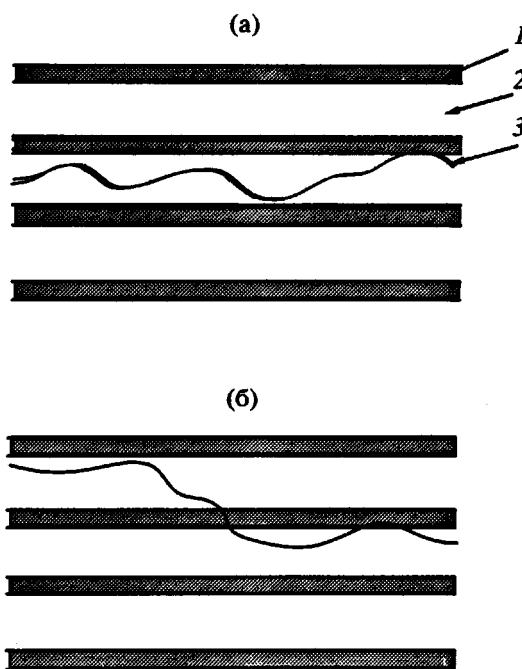


Рис. 9. Схематическое изображение механизмов расслоения. 1 и 2 – слои ПК и САН, 3 – трещина. Пояснения в тексте.

гезионно-адгезионный с преобладанием доли когезионного разрушения.

На рис. 7в приведена электронная фотография поверхности разрушения образца, в котором трещина пересекала к соседним слоям САН. Верхняя и нижняя части фотографии представляют поверхность края в САН. В центре фотографии наблюдается грубая линия, образованная в результате скачка трещины между двумя соседними слоями САН. Эта линия образована слоем пластически деформированного ПК. Вблизи этой линии слой ПК оторван от нижележащего САН, и значительная часть поверхности ровная вследствие локально адгезионного расслоения. Следует отметить, что расслоение является когезионным (через САН) как до, так и после скачка трещины.

### ИК-СПЕКТРЫ

На рис. 8 приведены ИК-спектры обеих поверхностей разрушения. На рис. 8а наблюдаются ярко выраженные пики поглощения САН при 698, 757, 1453 и 1493 см<sup>-1</sup>. Можно заметить также и следы значительно более слабого тройного пика ПК при 1163, 1194 и 1232 см<sup>-1</sup>. ИК-спектры парной поверхности (рис. 8б) практически идентичны. Таким образом, ИК-спектры подтверждают выводы, сделанные на основе микроскопического исследования поверхности разрушения, о том, что механизм разрушения в основном когезионный, через слой САН и доля площади адгези-

онного разрушения гораздо ниже, чем доля когезионного разрушения.

На рис. 9 приведено схематическое изображение обоих механизмов расслоения. Разрушение в основном когезионное, причем различие между механизмами заключается в том, что расслоение происходит или лишь через один, или через несколько слоев САН.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

#### *Определение $G_{lc}$ при различной толщине консолей*

В настоящем разделе выведено уравнение, позволяющее определить вязкость разрушения при различной толщине консолей. Для этого рассмотрена двухконсольная балка, показанная на рис. 10. Проблема решена методом, описанным в работе [13]. При фиксировании смещения зажимов испытательной машины трещина растет, если упругая энергия, высвобождающаяся при движении трещины, равна энергии образования новой поверхности. Поэтому вязкость разрушения обычно определяют путем дифференцирования полной энергии упругой деформации  $U$  по приращению длины трещины  $L$  при фиксированном смещении зажимов как

$$G_{lc} = -\left.\frac{\partial U}{\partial L}\right|_{D=\text{const}}.$$

Согласно работам [16, 17], вязкость разрушения может быть найдена также как производная упругой энергии по длине трещины при фиксированной внешней силе

$$G_{lc} = \left.\frac{\partial U}{\partial L}\right|_{F=\text{const}}. \quad (\text{A1})$$

Заметим, что знак перед производной поменялся на плюс. Пренебрегая растягивающими напряжениями, запишем упругую энергию изгиба балки

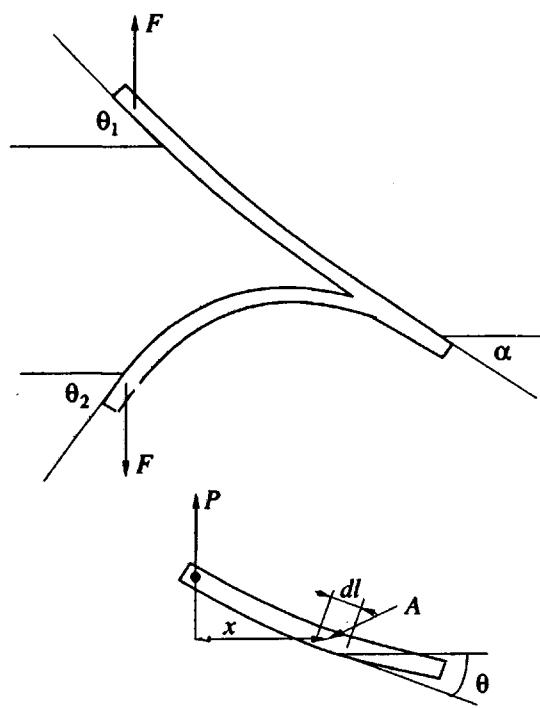
$$U = \int_0^L M^2 / (wEI_1) dl, \quad (\text{A2})$$

где  $M$  – изгибающий момент на расстоянии  $x$  от точки приложения нагрузки,  $E$  – модуль упругости материала,  $I_1 = wh^3/12$  – момент инерции сечения балки (индекс 1 относится к первой консоли),  $w$  – ширина и  $h$  – толщина балки,  $L$  – полная длина консоли.

При подстановке уравнения (A2) в выражение (A1) дифференцирование по верхнему пределу с учетом обеих консолей дает

$$G_{lc} = M^2/2EI_1 + M^2/2EI_2, \quad (\text{A3})$$

где индекс 2 относится ко второй консоли.



**Рис. 10.** Схема, поясняющая метод расчета вязкости разрушения:  $\alpha$  – угол изгиба кончика трещины,  $dl$  – элемент балки,  $\theta$  – текущее значение угла изгиба,  $x$  – момент силы в точке  $A$ .

Если нагрузка, приложенная к концу балки, равна  $F$ , то изгибающий момент  $M$  на расстоянии  $x$  от точки приложения нагрузки равен

$$M = Fx. \quad (A4)$$

В предположении, что поведение балки линейно-упругое, радиус кривизны рассматриваемого элемента балки (рис. 10) описывается так:

$$1/R = M/EI_1. \quad (A5)$$

Радиус кривизны может быть описан также уравнением

$$R = dl/d\theta \quad (A6)$$

( $dl$  и  $d\theta$  – дифференциалы длины и угла изгиба балки). Аналогично дифференциал длины  $dl$  равен

$$dx = dl \cos \theta, \quad (A7)$$

где  $dx$  – проекция этого элемента на ось, перпендикулярную направлению силы. Совместное решение уравнений (A4) – (A7) приводит к уравнению

$$EI_1 \cos \theta / (Fx) = dx / d\theta. \quad (A8)$$

Интегрированием уравнения A8 получаем

$$X_0^2 / 2 = EI_1 / F (\sin \theta_1 - \sin \alpha_1). \quad (A9)$$

Здесь  $X_0$  – плечо силы в кончике трещины,  $\theta_1$  – угол изгиба консоли,  $\alpha_1$  – угол изгиба рассматриваемой консоли в кончике трещины ( $\alpha_1$  равно нулю при равной толщине консоляй)

Рассматривая две консоли и учитывая, что в кончике трещины для второй консоли  $\alpha = -\alpha_1$ , при подстановке уравнения A9 в A3 можно получить уравнение (1). Таким образом, уравнение (1) позволяет определить вязкость разрушения при неравной толщине консоляй, если экспериментально измерены углы изгиба балок и критическая сила. Отметим, что при выводе этой формулы не предполагалось, что изгиб является слабым.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shrenk W.J. Pat. 3 884 606 USA. 1975.
2. Shrenk W.J., Alfrey T., jr. // Polymer Blends / Ed. by Paul D.R., Newman S. N.Y.: Academic, 1978. V. 1. Ch. 15. P. 129.
3. Shrenk W.J., Chrisholm D.S., Cleereman K.J., Alfrey T., jr. Pat. 3 567 707 USA. 1971.
4. Radford J.A., Alfrey T., jr., Shrenk W.J. // Polym. Eng. Sci. 1973. V. 13. P. 216.
5. Gregory B.L., Siegman A., Im J., Hiltner A., Baer E. // J. Mater. Sci. 1987. V. 22. P. 532.
6. Ma M., Vijayan A.K., Hiltner A., Baer E., Im J. // J. Mater. Sci. 1990. V. 25. P. 2039.
7. Im J., Baer E., Hiltner A. // High Performance Polymers. N.Y.: Hansen Publishers, 1990. Ch. 9.
8. Keitz J.D., Barlow J. W., Paul D.R. // Appl. Polym. Sci. 1984. V. 29. P. 3131.
9. Gilman J.J. // J. Appl. Physics. 1960. V. 31. P. 2208.
10. Smith G., Green A.K., Bowyer W.H. // Proc. Conf. Fracture Mechanics in Engineering Practice / Ed. by Stanley P. Sheffield: Appl. Sci. Publ., 1977.
11. Bascom W.P., Bitner J.L., Moulton R.J., Siebert A.R. // Composites. 1980. V. 11. P. 9.
12. Sela N., Ishai O. // Composites. 1989. V. 20. P. 423.
13. Williams J.G. // J. Comp. Mater. 1987. V. 21. P. 330.
14. Bazhenov S.L. // Composites. 1991. V. 22. P. 275.
15. Comprehensive Polymer Science / Ed. by Booth C., Price C. Oxford: Pergamon Press, 1990. V. 2.
16. Райс Дж. // Разрушение / Под ред. Либовиц Г. М.: Мир, 1975. Т. 2. С. 340.
17. Парトン В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985.

# Mechanism of Delamination in Microlayer Composites of Polycarbonate and Styrene-Acrylonitrile Copolymer

S. L. Bazhenov\*, K. Selitti\*\*, A. Hiltner\*\*, and E. Baer\*\*

\*Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 4, Moscow, 117977 Russia

\*\*Department of Macromolecular Science, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 44106 USA

**Abstract** – The mechanism of delamination in polymer composite composed of 194 alternating layers of plastic polycarbonate and more brittle styrene-acrylonitrile copolymer was studied by means of dual-cantilever bending. Delamination was shown to possess a cohesive character, and a crack was shown to propagate through crazes in the layers of styrene-acrylonitrile copolymer. Two slightly different mechanisms of delamination were observed. The first mechanism is associated with crack propagation within a single layer of styrene-acrylonitrile copolymer, while in the second case, a crack growth involves the neighboring layers. The equation for interlayer fracture toughness at variable thickness of cantilevers of dual-cantilever bending was derived. This equation allowed description of both weak and strong bending of the cantilevers. The method for estimation of fracture toughness by measuring the bending angle between the cantilever ends, which was based on the above equation, was advanced. When delamination was accompanied by crack jump between the neighboring layers of styrene-acrylonitrile copolymer, a crack propagates through the layer of plastic polycarbonate, and fracture toughness was shown to increase.