

УДК 541.64:539.3

ЭВОЛЮЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ ФРАГМЕНТОВ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФАЛАТНОЙ ПОДЛОЖКИ¹

© 2005 г. А. Л. Волынский*, Хэ Цзянпин**, С. Л. Баженов***,
Л. М. Ярышева*, Н. Ф. Бакеев***

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Химический факультет
119992 Москва, Ленинские горы

**Московский инженерно-физический институт (Технический университет)
115522 Москва, Каширское ш., 31

***Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколова
Российской академии наук
117393 Москва, Профсоюзная ул., 70

Поступила в редакцию 04.03.2004 г.
Принята в печать 26.10.2004 г.

Исследован процесс фрагментации тонкого металлического покрытия при деформировании ПЭТФ-подложки. Определен вид распределения фрагментов по размерам и его эволюция при изменении условий деформирования полимера-подложки. На начальных этапах деформирования полимера-подложки (в области относительно малых напряжений) реализуется механизм случайной фрагментации покрытия. На этой стадии определяющее значение для процесса фрагментации имеют дефекты в покрытии, которые всегда присутствуют в реальном твердом теле. Дефекты распределены в покрытии случайным образом, и возникновение трещин разрушения также происходит случайным образом. Увеличение относительной деформации (напряжения) приводит к изменению механизма разрушения покрытия. В этих условиях начинает превалировать механизм фрагментации путем деления каждого фрагмента на две равные части.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение свойств полимерных пленок с тонким твердым покрытием имеет как прикладное, так и научное значение. Пленки с тонким твердым покрытием выпускаются в промышленном масштабе, объем их производства непрерывно растет, исчисляясь в настоящее время сотнями тысяч тонн. В частности, ПЭТФ-пленки с покрытием из оксидов кремния отлично зарекомендовали себя в качестве новых кислородизолирующих материалов в пищевой и фармацевтической промышленности [1]. Использование полимерных пленок как основы для нанесения тонких прозрачных электропроводящих слоев позволяет создавать легкие, гибкие, небьющиеся ЖК-дисплеи [2]. Для использования указанных материа-

лов важнейшее значение имеет понимание механизмов разрушения нанесенных слоев, их отслаивания от полимерной основы в процессе разного рода деформаций и термообработок. В свою очередь указанные явления целиком обусловлены особенностями передачи механического напряжения через фазовую границу полимер – покрытие.

Проблема передачи механического напряжения в двухфазных системах с участием полимерного компонента требует решения и при создании волокнисто-наполненных композитов [3]. Передача механического напряжения между фазами в таких системах протекает в тонких поверхностных слоях и определяет характер разрушения наполняющих волокон в структуре композита и покрытия при деформировании полимера-подложки. Эти процессы имеют много общего, в связи с чем подходы, развитые для анализа деформационно-прочностных свойств композитов были распространены на деформацию полимерных пленок, имеющих тонкое жесткое покрытие. В не-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 03-03-32748 и 03-03-32085).

E-mail: Volynskii@mail.ru (Волынский Александр Львович).

давних работах [4, 5] такого рода анализ был использован для описания процессов разрушения тонких (30–150 нм) упругохрупких покрытий на основе диоксида кремния при деформировании полимерной основы (двуосно-ориентированной пленки ПЭТФ). В этой работе фрагментация покрытия описана в рамках подхода Келли–Тайсона [6], разработанного для процесса разрушения волокна, включенного в структуру композита. Авторы полагают, что такой подход удовлетворительно описывает полученные экспериментальные данные. Однако из анализа экспериментальных данных, полученных в работах [4, 5], видно, что указанный подход не описывает начальный этап разрушения покрытия в области его упругой деформации, а также область перехода к пластическому характеру деформирования полимера-подложки. Вместе с тем в недавних работах [7–9] было показано, что подход Келли–Тайсона не в полной мере отражает и случай деформирования полимера с тонким жестким покрытием.

Необходимо отметить, что во всех цитированных работах проводили анализ механизма разрушения (фрагментации) покрытия или волоконных наполнителей, оперируя средними значениями размеров фрагментов разрушения. Разумно предположить, что анализ распределений фрагментов разрушения по размерам позволит получить существенно более полную и объективную информацию о процессах разрушения покрытия при деформировании полимерной подложки.

Цель настоящей работы – детальное микроскопическое исследование процесса фрагментации пластичного металлического покрытия (алюминия) при деформировании пластичной полимерной подложки (ПЭТФ), а также выявление влияния тонких деталей процесса фрагментации покрытия путем анализа распределений фрагментов покрытия по их размерам и их эволюции в процессе деформации полимера-подложки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали промышленные пленки аморфного неориентированного ПЭТФ толщиной 70 мкм с нанесенным на них методом термического напыления в вакууме тонким (1.7–9.0 нм) слоем алюминия. Контроль толщины алюминиевого покрытия осуществляли измеряя

его электропроводность с помощью мультиметра M890G. Из пленок с металлическим покрытием вырубали образцы в виде двусторонних лопаток с размерами рабочей части 6 × 22 мм. Образцы растягивали при контролируемой скорости растяжения до необходимой степени удлинения с помощью стандартного динамометра “Instron 1122” в интервале температур от комнатной до 90°C. Электронно-микроскопические исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа “Hitachi S-520”. Геометрические размеры образцов определяли оптиметром ИЗВ-2 и проектором с 10-кратным увеличением.

Статистическую обработку получаемых данных по фрагментации покрытия при растяжении полимера-подложки осуществляли следующим образом. Для каждого образца получали несколько микрофотографий, на которых общее количество фрагментов разрушения покрытия было не менее 200. На проекторе с 10-кратным увеличением измеряли размер каждого из фрагментов в направлении оси растяжения. Ниже приведена методика получения кривых распределения фрагментов по размерам.

Для образца, растянутого на 15%, на фотографиях количество фрагментов составляет 138, общая длина всех фрагментов – 1632 мкм, отсюда получим средний размер $L = 1632/138 = 11.82$ мкм. Весь диапазон размеров фрагментов делим на четыре равных интервала, в результате чего получаем ширину каждого интервала $D = 11.82/4 = 2.955$ мкм. Таким образом, можем разделить диапазон размеров фрагментов на такие интервалы: 0–2.995, 2.995–5.91, 5.91–8.87...29.55–32.51 мкм. Далее подсчитываем количество фрагментов, попадающих по размерам в данный интервал. Например, в интервале 2.995–5.91 мкм, имеется 21 фрагмент. Процент этих фрагментов от общего количества фрагментов составляет $21/138 = 15.2\%$.

Аналогичным образом получаем процентное содержание фрагментов данного размера и для других выбранных интервалов. Чтобы построить кривые распределения фрагментов по размерам, разделим процентное содержание фрагментов, находящихся в данном интервале, на среднее значение ширины интервала.

Таким образом, получаем график распределения фрагментов покрытия по размерам (по ширине

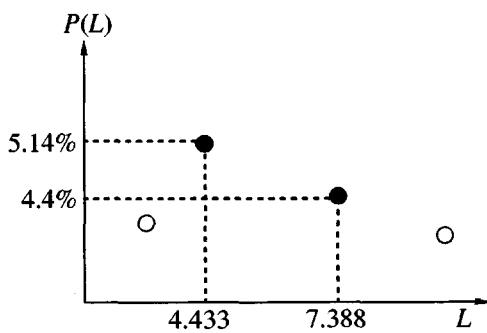


Рис. 1. Схема обработки экспериментальных данных для построения распределения фрагментов покрытия по размерам.

не) в направлении оси растяжения. Пример построения распределения фрагментов покрытия по размерам представлен на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как было отмечено выше, в работах [7–9] обсуждали среднюю ширину фрагментов покрытия. Прогрессирующее дробление покрытия в процессе растяжения полимерной подложки обусловлено передачей напряжения от подложки к покрытию. Предполагая, что покрытие разрушается, когда растягивающее напряжение достигает предела прочности (рис. 2), получили выражение для средней ширины фрагментов, имеющих идеальную адгезию с подложкой [7–9]

$$L = \frac{3\sigma^* h}{\sigma}, \quad (1)$$

где L — ширина фрагмента покрытия в направлении действующей растягивающей нагрузки, σ — напряжение в подложке, и σ^* — предел прочности покрытия при растяжении. Согласно уравнению (1), ширина фрагмента пропорциональна толщине покрытия h и обратно пропорциональна приложенному к подложке напряжению σ . Выражение (1) довольно хорошо описывает среднюю ширину фрагментов и удовлетворительно соответствует прямым экспериментальным оценкам средних размеров фрагментов разрушения покрытий [7–9].

Соотношение (1) предполагает, что при увеличении напряжения σ в подложке фрагменты дробятся посередине. Рост напряжения σ приводит к следующему шагу дробления. Такая модель пре-

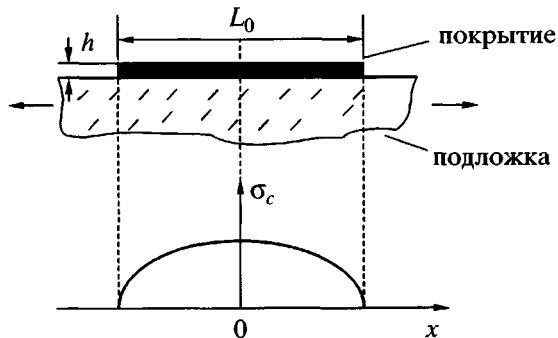


Рис. 2. Схематическое изображение фрагмента покрытия на податливом основании и распределения в нем напряжений при растяжении подложки.

дусматривает последовательное дробление покрытия на 2, 4, 8, 16 и т.д. фрагментов.

Механизм фрагментации покрытия путем его “деления” на две равные части впервые был рассмотрен и экспериментально обоснован в работах [7–9]. Попытаемся охарактеризовать распределение фрагментов по размерам для этого случая фрагментации покрытия при деформировании полимера-подложки.

Анализ основан на формуле, описывающей растягивающее напряжение в жестком фрагменте, адгезионно связанном с более мягкой подложкой [9, 10]:

$$\sigma_c = \frac{L\sigma\sqrt{L^2/4 - x^2}}{h(1+d)} \quad (2)$$

Здесь σ_c — напряжение в покрытии; σ — напряжение, приложенное к подложке, h — толщина покрытия; x — расстояние от середины фрагмента; L — полуширина фрагмента; d — безразмерный коэффициент, определяемый соотношением

$$d = \frac{LE}{4hE_c}, \quad (3)$$

где E и E_c — модули упругости подложки и покрытия соответственно.

Согласно формуле (2), растягивающее напряжение в покрытии при $x = L/2$, т.е. вблизи трещины, равно нулю. Поскольку в целом каждый фрагмент покрытия адгезионно связан с деформируемой подложкой, которая продолжает деформироваться, он воспринимает от нее механическое напряже-

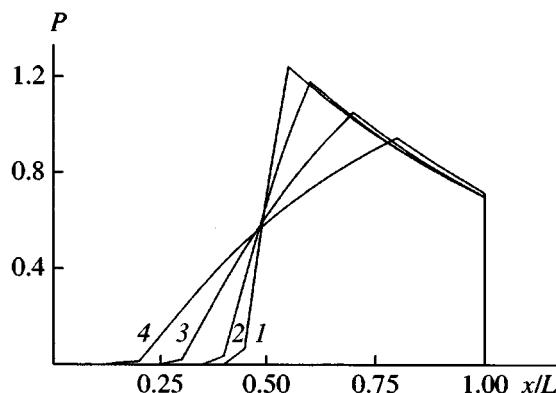


Рис. 3. Функция распределения фрагментов по ширине в зависимости от отношения x/L , где L – максимальная ширина фрагмента. $\delta/L = 0.05$ (1), 0.1 (2), 0.2 (3) и 0.3 (4).

ние. Вследствие этого распределение напряжения в каждом фрагменте покрытия оказывается неравномерным. Очевидно, что, будучи равным на его краях нулю, напряжение в центре каждого фрагмента максимально. Как следствие, вероятность появления трещины вблизи края каждого фрагмента мала. Распределение растягивающего напряжения по ширине каждого фрагмента в направлении оси растяжения полимера-подложки приведено на рис. 2. Максимум растягивающих напряжений приходится на середину фрагмента. Как следствие, и вероятность разрушения фрагмента максимальна вблизи середины фрагмента. Такой механизм фрагментации покрытия на две равные части был продемонстрирован в прямых микроскопических экспериментах в работе [8].

Предположим, что фрагмент шириной L при достижении предела прочности на разрыв делится точно посередине. Ширина вторичных фрагментов равна $L/2$, а их количество вдвое больше, чем фрагментов шириной L . Очевидно, в этом случае не будет фрагментов короче $L/2$ и не будет фрагментов длиннее L .

Если фрагмент делится точно посередине, форма распределения фрагментов по ширине зависит от начальных условий, т.е. от их начального распределения по размерам. Однако, как показало проведенное компьютерное моделирование дробления покрытия [11], если фрагмент делится точно посередине, форма распределения фрагментов по размерам мало зависит от начальных условий, т.е. от их начального распределения. Это связано с тем, что вторичные фрагменты от-

личаются по ширине от первичных и через несколько циклов дробления форма распределения перестает зависеть от начальных условий, причем процесс сходится тем быстрее, чем больше вторичные фрагменты различаются по ширине.

На рис. 3 представлены результаты расчетов формы распределения, проведенных в предположении, что фрагменты с равной вероятностью дробятся в интервале от $L/2 - \delta$ до $L/2 + \delta$. Кривые 1–4 соответствуют отношениям $\delta/L = 0.05, 0.1, 0.2$ и 0.3. Как видно, случай дробления покрытия на две равные части приводит к реализации весьма необычных распределений фрагментов по размерам. Прежде всего необходимо отметить характерную форму таких распределений. Они напоминают некий ящик, резко ограниченный по размерам, в области как больших, так и малых размеров фрагментов. Фрагменты шириной более L отсутствуют, поскольку такие фрагменты дробятся на две части. Второй особенностью распределения является отсутствие очень коротких фрагментов. Максимум распределения достигается при ширине, равной $L/2 \pm \delta$.

Иной, более известный случай фрагментации покрытий при деформации податливой полимерной подложки – это дробление случайнным образом. В литературе [4, 5, 12, 13] имеются попытки анализа фрагментации покрытия происходящего случайнным образом, однако соответствующего распределения фрагментов по размерам в этих работах найдено не было.

Попытаемся найти такое распределение. Случайный механизм фрагментации предусматривает равновероятное появление трещины в любой точке покрытия независимо от ее удаленности от края любого фрагмента. Пусть вероятность появления трещины одинакова во всех точках и равна ρ_0 , тогда общее количество трещин $N = \rho_0 L$. Чтобы фрагмент имел ширину от x до $x + dx$ необходимо одновременное выполнение двух условий – на отрезке $[0, x]$ трещины не было, а на отрезке $[x, x + dx]$ она была. Трещины появляются случайно, и эти события независимы. Вероятность двух независимых событий равна произведению их вероятностей. Вероятность второго события, очевидно, составляет $\rho_0 dx$.

Для решения поставленной задачи необходимо определить вероятность того, что на отрезке $[0, x]$ трещины нет. Пусть эта вероятность равна $P(x)$.

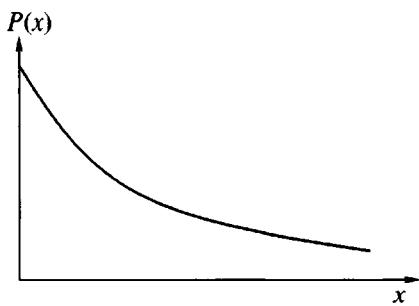


Рис. 4. Распределение фрагментов по ширине для модели случайного дробления покрытия.

Вероятность того, что на отрезке $[0, x + dx]$ трещины также нет, равна произведению вероятностей того, что ее нет на отрезках $[0, x]$ и $[x, x + dx]$. $P(x + dx) = P(x)(1 - \rho_0 dx)$, где $\rho_0 dx$ – вероятность появления трещины в элементе длиной dx . В то же время $P(x + dx) = P(x) + P'(x)dx$. Отсюда получаем дифференциальное уравнение

$$P'(x) = -\rho_0 P(x) \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид $P(x) = Ce^{-\rho_0 x}$, где C – некоторая константа. Определяем ее из условия нормировки $\int_0^\infty P(x)dx = 1$, откуда получаем $P(x) = \rho_0 e^{-\rho_0 x}$. Среднюю ширину фрагментов L определяем интегрированием $L = \int_0^\infty P(x)x dx = 1/\rho_0$, и искомое распределение фрагментов по ширине таково:

$$P(x) = \frac{e^{-x/L}}{L} \quad (5)$$

Вид распределения $P(x)$ приведен на рис. 4. Форма распределения свидетельствует о том, что фрагментация покрытия путем случайного дробления приводит к появлению фрагментов практически любого размера.

На рис. 5 приведено распределение фрагментов разрушения А1 покрытия при скоростях растяжения ПЭТФ-подложки 0.1, 10 и 1000 мм/мин и температуре 90°C, полученное при анализе соответствующих микрофотографий. Хорошо видно, что повышение скорости растяжения приводит к уменьшению ширины фрагментов. Это объясняется увеличением напряжения в подложке с повышением скорости растяжения. Как следствие,

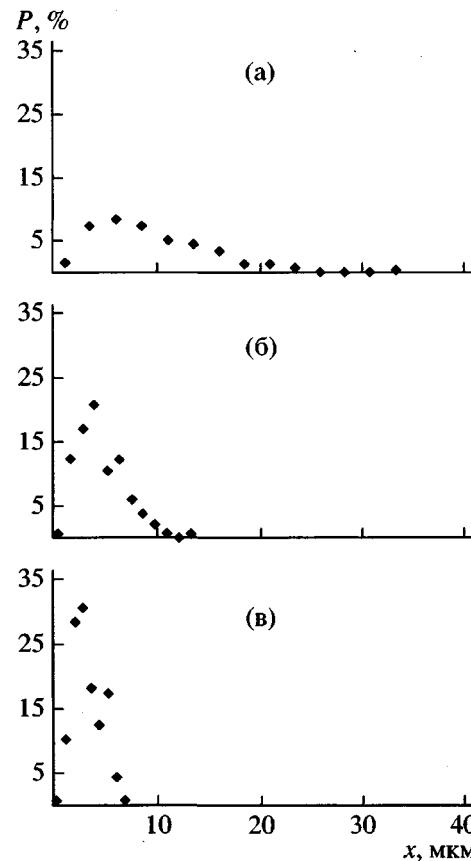


Рис. 5. Распределения фрагментов покрытия по ширине для образцов ПЭТФ/А1 при растяжении на 100% при 90°C со скоростью 0.1 (а), 10 (б) и 1000 мм/мин (в). $L = 9.87$ (а), 4.66 (б) и 3.25 мкм (в).

ширина фрагментов уменьшается в согласии с уравнением (1). Помимо средней ширины фрагментов, с ростом скорости растяжения изменяется также форма распределения. При скорости растяжения 0.1 мм/мин распределение имеет значительную ширину, и весьма узкие фрагменты существуют с широкими (рис. 5а). В целом при этой скорости растяжения наблюдается экспоненциальный вид распределения, за исключением очень коротких фрагментов, что свидетельствует в пользу случайного механизма разрушения покрытия.

Тем не менее, количественное сравнение экспериментальных данных с теоретической кривой для случайного распределения дефектов (3) показывает (рис. 6), что некоторое отклонение имеется не только при малой, но и при большой ширине фрагментов. С повышением скорости растяжения полимера-подложки форма кривой распре-

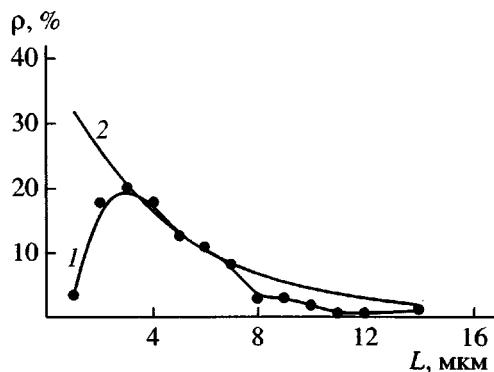


Рис. 6. Сравнение распределения фрагментов алюминиевого покрытия по размерам, полученного при анализе микроскопических картин разрушения образца ПЭТФ/A1, деформированного на 100% при 90°C со скоростью 0.1 мм/мин (1) с теоретическим распределением (2).

деления все более отклоняется от экспоненциального вида, и при скорости 1000 мм/мин она больше похожа на модельные кривые, представленные на рис. 3.

Таким образом, увеличение скорости растяжения изменяет вид функции распределения. Это означает, что рост скорости растяжения приводит к изменению механизма дробления покрытия от случайного к дроблению на две примерно равные части. Полученный результат свидетельствует о том, что анализ кривых распределения фрагментов покрытия по размерам позволяет иметь дополнительную информацию о механизме фрагментации покрытия, которая неочевидна при визуальном наблюдении процесса разрушения покрытия или при изучении среднего размера, которое использовалось ранее [7–9].

Важные данные о механизме фрагментации покрытия дает анализ дисперсии распределений фрагментов по размерам. Этот параметр позволяет получить объективную информацию о ширине соответствующих распределений фрагментов по размерам. Относительная дисперсия рас-

пределения определялась как $\sqrt{\frac{\sum (x - L)^2}{nL^2}}$, где

L – средний размер фрагментов, n – их число.

На рис. 7 (кривая 1) приведено изменение относительной дисперсии распределения фрагментов по размерам при трех скоростях растяжения (0.1, 10 и 1000 мм/мин). На этом же рисунке пред-

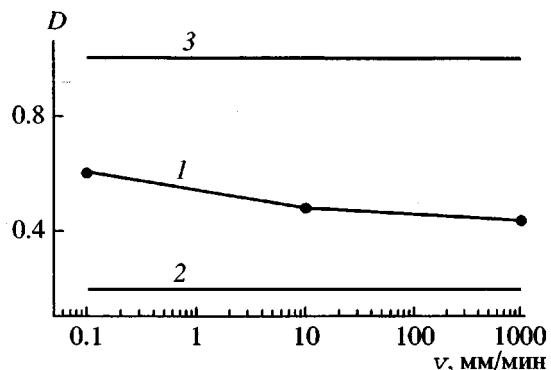


Рис. 7. Зависимость относительной дисперсии распределений фрагментов по размерам от скорости растяжения на 100% полимера-подложки при 90°C для образцов ПЭТФ/A1. Приведены экспериментальные данные (1) и вычисленные для случая дробления покрытия пополам (2) и случайного дробления (3).

ставлены дисперсии распределения при случайному дроблению покрытия (прямая 2) и делении точно пополам (прямая 3). Увеличение скорости приводит к уменьшению дисперсии, т.е. происходит сужение распределения. Это в свою очередь подтверждает сделанный выше вывод о том, что при повышении скорости растяжения наблюдается переход от случайного дробления к делению на две примерно равные части.

Кривые, описывающие форму распределения фрагментов по ширине при различных температурах растяжения, а также средние размеры фрагментов показаны на рис. 8. Можно заметить, что, как и при изменении скорости растяжения полимера-подложки (рис. 5), наблюдаются две различные формы распределения. Кривые на рис. 8в и 8г имеют форму, близкую к экспоненциальному, в то время как кривые на рис. 8д и 8а демонстрируют узкое распределение, характеризующее случай фрагментации путем дробления фрагментов на две равные части. Рисунок 8б имеет промежуточный вид. Если построить эти рисунки не в порядке роста температуры, а по возрастанию напряжения в подложке (8г, 8в, 8б, 8д, 8а), то вполне очевидной становится тенденция изменения формы с увеличением напряжения в подложке. Повышение напряжения в подложке, независимо от того, происходит ли это вследствие роста скорости деформирования в изотермических условиях или при кристаллизации полимера из-за увеличения температуры (ср. рис. 5 и 8), приводит к сходным последствиям. В обоих слу-

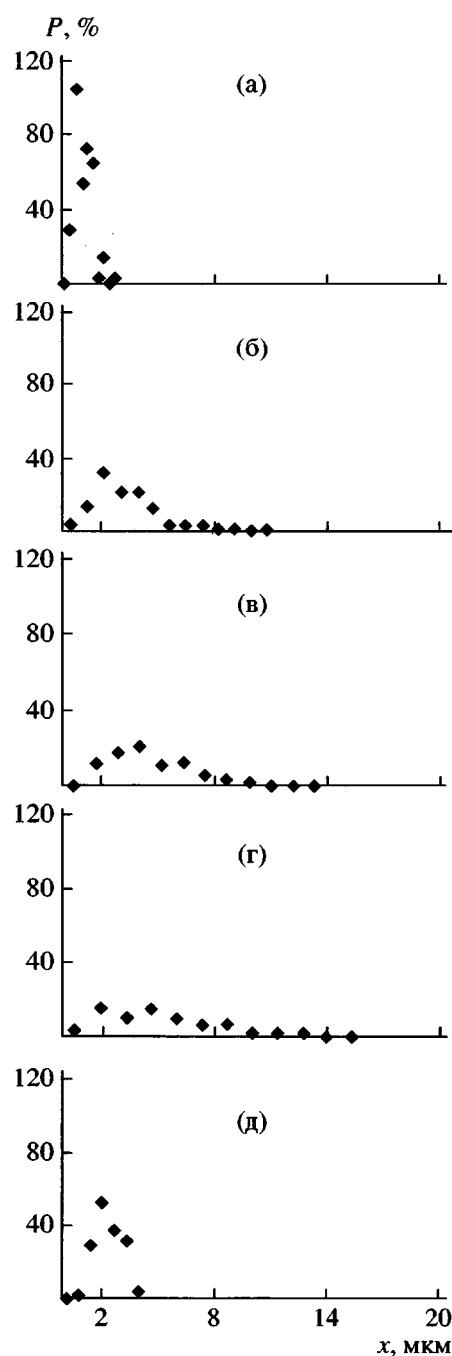


Рис. 8. Распределения фрагментов покрытия по ширине для образцов ПЭТФ/А1 при растяжении на 100% со скоростью 10 мм/мин при 40 (а), 85 (б), 90 (в), 100 (г) и 110°C (д). $L = 1.15$ (а), 3.46 (б), 4.66 (в), 5.35 (г) и 2.49 (д).

чаях с ростом напряжения в подложке прослеживается тенденция перехода от случайного разрушения покрытия к делению пополам каждого его фрагмента. Хотя формы распределений являются смешанными во всех случаях, однако тенденция к переходу очевидна.

Подытоживая сказанное, можно заключить, что анализ распределений фрагментов разрушения покрытия по размерам и его эволюции в процессе деформации полимера-подложки позволяет получить новую и весьма важную информацию о механизме процесса разрушения покрытия. Оказывается, что на начальных этапах деформирования полимера-подложки (в области относительно малых напряжений) реализуется случайный механизм фрагментации покрытия. На этой стадии главное значение для процесса фрагментации имеют дефекты в покрытии, которые всегда присутствуют в реальном твердом теле. Поскольку эти дефекты распределены в покрытии случайным образом, возникновение трещин разрушения происходит также случайным образом. При увеличении относительной деформации (напряжения) изменяется механизм разрушения покрытия. На этой стадии начинает превалировать механизм фрагментации путем деления каждого фрагмента на две равные части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Felts J.T. // *J. Plast. Film. Sheet.* 1993. V. 9. P. 139.
2. Cairns D.R., Sparacinc D.K., Paine D.C., Crawford G.P. // SID Int. Symp. Digest of Technical Papers. San Jose, California, USA, 2000. P. 274.
3. Pitkethy M.J., Favre J.P., Gaur U., Jakubowsky J., Mudrich S.F., Coldwell D.L., Dzal L.T., Nadrik M., Wagner H.D., Dilandro L., Hampe A., Armisted J.P., Desaege M., Verpoest J. // *Comp. Sci. Technol.* 1993. V. 48, № 2. P. 205.
4. Leterrier Y., Bogh L., Andersons J., Manson J.-A.E. // *J. Polym. Sci., Polym. Phys.* 1997. V. 35. № 9. P. 1449.
5. Leterrier Y., Andersons J., Pitton Y., Manson J.-A.E. // *J. Polym. Sci., Polym. Phys.* 1997. V. 35. № 9. P. 1463.
6. Kelly A., Tyson W.R. // *J. Mech. Phys. Solid.* 1965. V. 13. № 2. P. 329.
7. Volynskii A.L., Bazhenov S.L., Lebedeva O.V., Ozerin A.N., Bakeev N.F. // *J. Appl. Polym. Sci.* 1999. V. 72. P. 1267.
8. Волынский А.Л., Воронина Е.Е., Лебедева О.В., Яминский И.В., Баженов С.Л., Бакеев Н.Ф. // Высокомолек. соед. А. 2000. Т. 42. № 2. С. 262.
9. Bazhenov S.L., Volynskii A.L., Alexandrov V.M., Bakeev N.F. // *J. Polym. Sci., Polym. Phys.* 2002. V. 40. P. 10.

10. Александров В.М., Мхитарян С.М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. М.: Наука, 1983.
11. Хэ Цзянпин. Дис. ... канд. хим. наук. М.: МГУ, 2001.
12. Letterier Y., Manson J.-A. // Eur. Conf. on Macromolecular Physics, Morphology and Micromechanics . Merseburg, Germany , 1998. P. 293.
13. Handge U.A., Sokolov I.M., Blumen A. // 11 Conf. on Deformation, Yield and Fracture of Polymers. Cambridge, UK, 2000. P. 213.

Evolution of Size Distribution of Fractured Fragments of Metallic Coating during Tensile Drawing of Poly(ethylene terephthalate) Substrate

A. L. Volynskii*, Khe Tsyanpin, S. L. Bazhenov***,
L. M. Yarysheva*, and N. F. Bakeev*****

**Faculty of Chemistry, Moscow State University,
Leninskie gory, Moscow, 119992 Russia*

***Moscow Institute of Engineering Physics,
Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115522 Russia*

****Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya ul. 70, Moscow, 117393 Russia*

Abstract—Fragmentation of a thin metal coating during the deformation of its PET substrate was investigated. The size distribution of fractured fragments was constructed, and its evolution during deformation under different loading conditions was analyzed. At the early stages of deformation (at relatively low stresses), tensile drawing of the polymer substrate entails the mechanism of random fragmentation of the coating. At this stage, the process of fragmentation is primarily controlled by the defects in the coating, which always exist in any solid. As the distribution of defects in the coating is random, the initiation of fracture cracks also proceeds in a random manner. An increase in the relative strain (stress) alters the coating fracture mechanism. Under these conditions, the mechanism of fragmentation via the breakdown of each fragment into two equal parts begins to dominate.