

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 541.64:621.315.833

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ
АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ***Чалых А. Е., Алиев А. Д., Рубцов А. Е.*

Приведены данные о структуре и концентрационных профилях в адгезионной зоне системы поливинилиденфторид – полиметилметакрилат, о взаиморастворимости компонентов, о кинетике установления гравитационных концентраций и о наличии диффузионных потоков. Рассмотрены закономерности распространения трещины в объеме адгезионного соединения и определен характер разрушения.

Достижения в области приборостроения, связанные с созданием эффективных детекторов рентгеновского излучения, анализаторов потерь электронов и Оже-электронов, привели в свою очередь к возникновению нового направления в физических методах исследования – аналитической электронной микроскопии. Если в традиционной просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии [1–3] основная задача исследования сводилась к получению информации о структурно-морфологических особенностях строения полимерных объектов, то в аналитической электронной микроскопии наряду с этими сведениями можно получать данные и об элементном составе, и о химической природе соединений, входящих в состав исследуемого объекта. Эти измерения могут осуществляться как на тонких пленках и срезах, так и на массивных образцах, монолитных и пористых, однофазных и многофазных системах.

В работах последних лет показано, что такой методический подход открывает новые возможности в изучении диффузионных процессов и переходных зон, диаграмм состояния и фазовой структуры конкретных полимерных материалов, кинетики фазовых превращений [3–8].

В данном сообщении на примере адгезионного соединения поливинилиденфторид (ПВФ_2) – ПММА рассмотрены те новые возможности, которые открывает совместное использование сканирующей, просвечивающей электронной микроскопии и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа, в изучении адгезионного контактирования полимеров, в локализации места прорастания трещины и в определении характера разрушения соединения.

В качестве объектов исследования использовали ПВФ_2 с $M=65\,000$ и $T_g=167^\circ$ и ПММА с $M=104\,000$ и $T_g=100^\circ$. Дублирование пленок ПВФ_2 толщиной 100 мкм и ПММА толщиной 1 мм осуществляли на контактно-тепловой установке прессового типа с малоинерционным нагревателем¹. Температура дублирования 200° , время изменения от 1 до 30 с. Затем образцы подвергали изотермическому отжигу при температурах от 160 до 280° в течение 1–30 мин. Приготовленные таким образом образцы срезали на ультрамикротоме, а затем пленку ПВФ_2 частично отслаивали от подложки (ПММА) под углом 180° (рис. 1). После напыления на поверхность среза слоя углерода толщиной не более 300 Å образцы просматривали на сканирующем электронном микроскопе с приставкой для микроанализа «Кевекс». Информацию о распределении компонентов в зоне адгезионного соединения получали по K_α -линии характеристического рентгеновского излучения фтора. Предварительно была получена калибровочная зависимость между интенсивностью характеристического рентгеновского излучения и концентрацией фтора в полимерных объектах. С этой целью использовали фторопласти разного состава. Просмотр и микроанализ образцов проводили в следующем режиме: ускоряющее напряжение 9 кВ, ток 10^{-10} ам, при котором не разрушалось место микроанализа (совпадает с направлениями сканирования, указанными на рис. 1, а) в течение 300–500 с.

Для отдельных образцов поверхность среза подвергали травлению в плазме высокочастотного кислородного разряда, а затем исследовали с помощью одноступенчатых угольно-платиновых реплик в просвечивающем электронном микроскопе ЕМ-301.

¹ Выражаем благодарность В. И. Рузакову, предоставившему дублированные образцы для исследований.

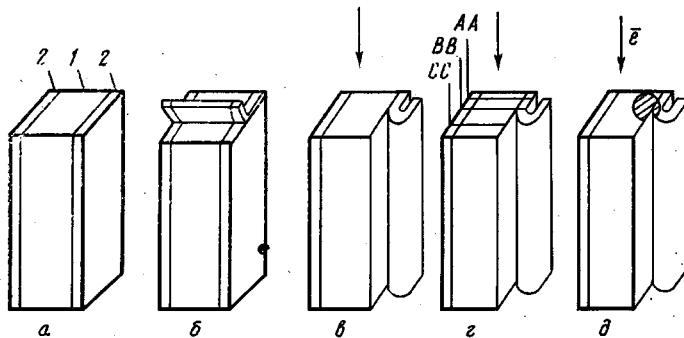


Рис. 1. Схема препарирования и исследования адгезионного соединения:
а – соединение после дублирования; б – срез; в – отслаивание пленки
ПВФ₂ и вакуумное напыление слоя углерода (показано стрелкой); г –
просмотр зон контактирования и разрушения, АА, ББ, ВВ – направления
сканирования при микроанализе, δ – травление поверхности среза в
плазме высокочастотного кислородного разряда и репликация

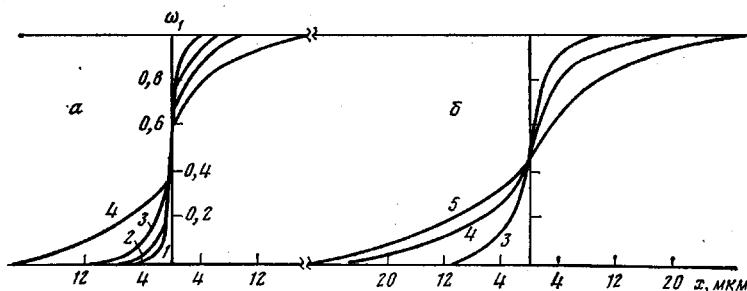


Рис. 2. Распределение концентраций в области адгезионного соединения ПВФ₂ – ПММА (сканирование вдоль АА), сформированного при 200 (а)
и 250° (б). Время дублирования 1 (1); 7 (2); 15 (3); 60 (4) и 1200 с (5)

Распределение компонентов в области контактирования полимеров. Известно, что эта информация имеет принципиальное значение и для анализа механизма формирования адгезионного соединения, и для суждения о совместимости полимеров, и для выяснения состояния переходной зоны [9–12].

Типичные кривые распределения концентрации в области адгезионного соединения ПВФ₂ – ПММА (направление сканирования А–А) приведены на рис. 2. Характер распределения и протяженность этих областей определяются температурно-временными условиями формирования контакта T_f и последующего термического отжига. С точки зрения наличия фазовой границы раздела в пределах зоны сопряжения исследованный нами температурный интервал можно разделить на две области: $T_f < \text{ВКТР}$ и $T_f > \text{ВКТР}$ (ВКТР – верхняя критическая температура растворения). Для системы ПВФ₂ – ПММА ВКТР равна 215°. Диаграмма фазового состояния этой системы приведена на рис. 3. С точки зрения кинетики установления на межфазной границе концентрации сосуществующих фаз (ω_1' и ω_1'' , ω_1 – объемная доля ПВФ₂) при $T_f < \text{ВКТР}$ можно говорить о малых ($t < \tau$) и больших ($t > \tau^2$) временах формирования соединения. В первом случае $\omega_1'(t) < \omega_1'$, во втором – $\omega_1'(t) = \omega_1'$.

При $T_f < 215^\circ$ и $t > \tau$ концентрационный профиль состоит из трех участков аналогично тому, как это ранее нами наблюдалось в системе ПВХ – ПММА [4]. В крайних областях составов $0 < \omega_1 < \omega_1'$ и $\omega_1'' < \omega_1 < 1$ концентрация изменяется плавно, тогда как в средней области – практически скачкообразно – от ω_1' до ω_1'' . Протяженность крайних областей составов изменяется с изменением времени формирования и отжига от 5 до 20 мкм, тогда как размеры средней области постоянны и сравнимы с размерами зоны генерации рентгеновского излучения (1,5 мкм).

Для этих условий формирования адгезионного соединения в процессе термического отжига изменение концентрационного профиля происходит лишь в областях крайних составов; в средней области экспериментально регистрируемое распределение интенсивности характеристического излучения остается неизменным. Не изменяются также при $T_f = \text{const}$ и величины ω_1' и ω_1'' . При $T_f > 215^\circ$ концентрационный профиль, возникающий в области адгезионного соединения ПВФ₂ с ПММА, представляет собой плавную S-образную кривую, каждая figurativная точка которой непрерывно изменяет свою координату по мере увеличения времени отжига или

² $\tau \approx 15$ с.

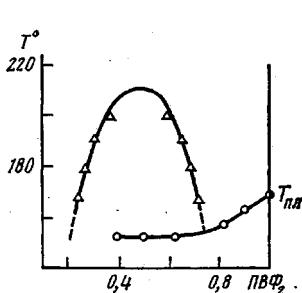


Рис. 3

Рис. 3. Диаграмма состояния системы ПВФ₂ – ПММА

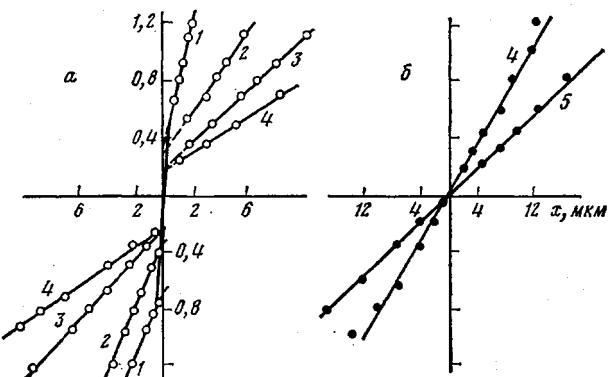


Рис. 4

Рис. 4. Распределение концентраций в области адгезионного соединения ПВФ₂ – ПММА (сканирование вдоль AA) при 200 (а) и 250° (б) в координатах уравнения (1). Время дублирования 1 (1); 7 (2); 30 (3), 60 (4) и 600 с (5)

дублирования. Заметим, что протяженность профиля в этих условиях достигает 50 мкм.

Особенно четко различие между характером распределения компонентов в области контактирования проявляется при построении профилей в координатах уравнения

$$\omega_1 = 1/2(1 - \operatorname{erf} Z), \quad (1)$$

где $Z = x/\sqrt{Dt}$ – табулированное значение интеграла Гаусса, x – координата диффузии, D – коэффициент диффузии. Можно видеть, что в этом случае кривые распределения концентрации для $T_\phi < \text{ВКТР}$ представляют собой три взаимно пересекающиеся прямые, тогда как для $T_\phi > \text{ВКТР}$ экспериментальные точки вполне удовлетворительно укладываются на единую прямую, проходящую через начало координат (рис. 4). Угол наклона прямых или их участков, соответствующих диффузионным зонам смешения, закономерно уменьшается по мере увеличения времени отжига.

Коэффициенты диффузии, рассчитанные по тангенсу угла наклона прямых $Z-x$ с учетом начального распределения компонентов, представлены в таблице. Погрешность в определении D для системы ПВФ₂ – ПММА составляет 12–15 %. Для сравнения в таблице приведены данные по значениям D и энергиям активации, найденные ранее для системы ПВХ – ПММА [4]. Видно, что величины энергий активации диффузии ПВФ₂ и ПВХ в расплаве ПММА близки между собой и приближаются к значению энергии активации вязкого течения ПММА.

Коэффициенты диффузии и энергия активации диффузии в системе ПВФ₂ – ПММА

Диффузант	Диффузионная среда	T	$D \cdot 10^{11}, \text{ см}^2/\text{с}$	$E_D, \text{ кДж/моль}$
ПВФ ₂	ПММА	180	5 *	72
ПММА	ПВФ ₂	180	2,01	64
ПВХ	ПММА	180	1,5 **	104
ПММА	ПВХ	180	1,4	128

* Измерения в диапазоне температур от 180 до 280°.

** Данные работы [4], полученные при измерении в диапазоне температур от 130 до 190°.

Особый интерес представляет информация об изменении концентрации и концентрационного профиля при малых временах дублирования компонентов. При $T_\phi < \text{ВКТР}$, как видно из рис. 2 и 4, происходит диффузионное проникновение контактирующих полимеров, сопровождающееся постепенным увеличением граничных концентраций. Кинетика их изменения приведена на рис. 5 и описывается в первом приближении уравнением

$$\omega_1' - \omega_1(t) = \omega_1' \exp(-t/\beta), \quad (2)$$

где $\omega_1(t)$ – граничная концентрация в момент времени t , ω_1' – концентрация, соответствующая составу существующей фазы, β – константа скорости, связанная со спектром времен релаксации [13]. При $T_\phi = 200^\circ$ $\beta \approx 3,7$ с.

Таким образом, рассмотрение распределения концентрации компонентов в зоне адгезионного контакта и его трансформации со временем формирования и отжига позволяет выделить на этом уровне исследования по меньшей мере две стадии: установление на межфазной границе составов существующих фаз и диффузионное перераспределение компонентов. Очевидно, что первая стадия адекватна наличию в зоне адгезионного контакта при $T_f < \text{ВКТР}$ межфазного натяжения между ПВФ₂ и ПММА в соответствии с их диаграммой состояния. Предполагая, что межфазное натяжение в полимерных растворах γ_{12} является аддитивной функцией межфазных натяжений ПВФ₂ (γ_1) и ПММА (γ_2 ³), по уравнению Гуда и Джирофалко [14]

$$\gamma_{12} \approx (\gamma_1 - \gamma_2)^2 \quad (3)$$

была рассчитана кинетика изменения межфазных натяжений в области адгезионного контакта ПВФ₂ – ПММА (рис. 6, б); γ_1 и γ_2 соответствуют ω_1' и ω_1'' .

Заметим, что в исследованных системах поверхность контактирующих полимеров имеет маловыраженный рельеф. Поэтому нам не удалось зафиксировать стадию

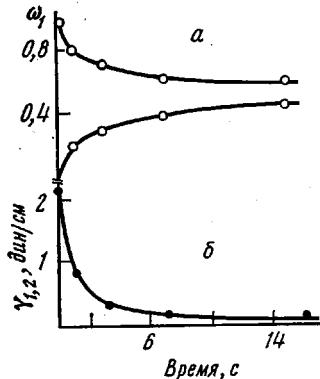


Рис. 5. Кинетика изменения в процессе дублирования граничных концентраций (а) и межфазного натяжения (б) в адгезионном соединении ПВФ₂ – ПММА ($T_f = 200^\circ$)

формирования межфазного контакта, связанную со смачиванием и заполнением неровностей поверхности. Во всяком случае, можно считать, что время, необходимое для прохождения этих процессов при исследованных нами условиях дублирования компонентов, меньше 2 с.

Локализация трещины в объеме адгезионного соединения. Для определения местонахождения разрушения в адгезионной области, иными словами, «слабого слоя» сандвичевой структуры [16, 17], обычно используют оптическую и электронную микроскопию, эпилсометрию и нарушенное полное внутреннее отражение ИК-спектроскопии, построение профилограмм и т. п., изучая с помощью этих методов поверхности адгезива и субстрата после разрушения их соединения. При такой организации эксперимента, как правило, не представляется возможным оценить исходное (до разрушения) структурно-концентрационное состояние и расположение слабого граничного слоя. В предлагаемой нами методике заключение о местонахождении разрушения делается на основе сопоставления концентрационных профилей, полученных с поперечного сечения адгезионного соединения до разрушения и на его элементах после разрушения.

На рис. 6, 7 приведены концентрационные профили, полученные при сканировании адгезионного соединения ПВФ₂ с ПММА вдоль направления АА, ББ, ВВ (рис. 1, г). На микрофотографии поперечного среза (рис. 6, а) указаны эти направления применительно к данному образцу. Положение устья трещины (оно отмечено на микрофотографии стрелкой) определяется не только визуально, но и по резкому изменению поглощенного тока, фиксируемого на ленте самописца одновременно с записью кривой распределения интенсивности характеристического рентгеновского излучения (рис. 6, б).

Сравнительный анализ концентрационных профилей до и после разрушения адгезионного соединения⁴, полученного при разных T_f и временах дублирования и отжига, позволяет сделать следующие выводы о локализации слабого слоя в объеме адгезионного соединения. При малых временах дублирования, когда $\omega_1(t)/\omega_1' \leq 0,4$, трещина распространяется преимущественно по межфазной границе раздела. При $t > \tau$, что соответствует $\omega_1(t) = \omega_1$, при $T_f < \text{ВКТР}$, т. е. когда завершился процесс установления граничных концентраций, трещина распространяется преимущественно в фазе раствора ПММА в ПВФ₂, в области составов $0,63 < \omega_1 < 0,65$. Заметим, что при $T_f > \text{ВКТР}$ и $t > \tau$ распространение трещины также происходит в области сандвичевой структуры, но концентрационная зона траектории трещины менее определена ($0,57 < \omega_1 < 0,65$). При временах дублирования, когда $0,4 <$

³ Согласно работе [15], $\gamma_{1,1} = 25$ и $\gamma_{2,2} = 42$ дин/см; $\gamma_1 = \gamma_{1,1}N_1 + \gamma_{2,2}N_2$, N_1 – мольная доля ПВФ₂, N_2 – ПММА.

⁴ Концентрационные профили на субстрате (ПММА) после разрушения соединения восстановлены с учетом размеров зоны генерации рентгеновского излучения.

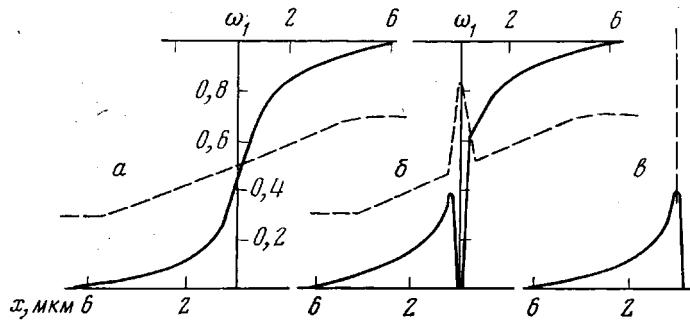
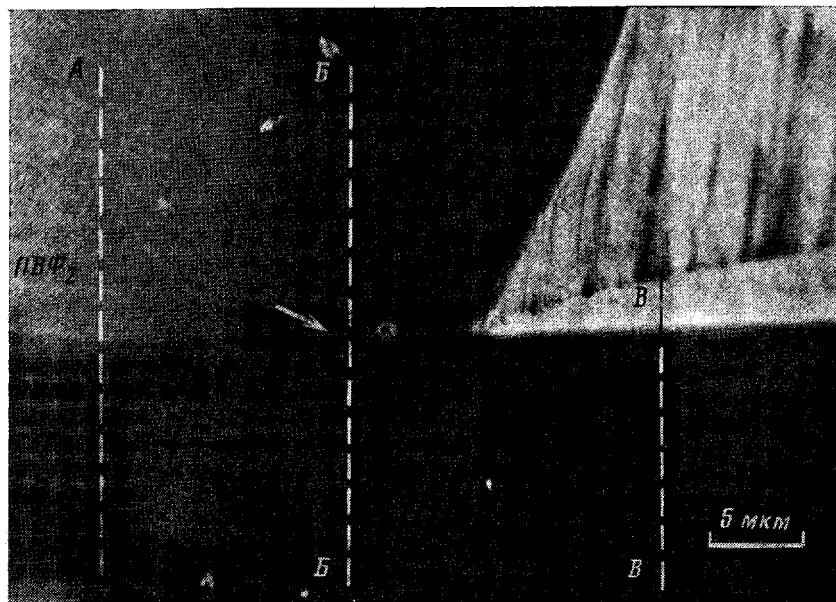


Рис. 6. Распределение концентрации в области соединения ПВФ₂ – ПММА ($T_{\phi}=200^{\circ}$, $t < t'$), полученное при сканировании поверхности среза по направлениям AA' (a), BB' (b), CC' (c). Штриховая линия соответствует распределению поглощенного тока

$\omega_1/\omega_1' < 1$, траектория трещины представляется в виде некоторой волновой функции, вписывающейся в коридор между фазной границей и $\omega_1 \approx 0,65$.

Полученные результаты свидетельствуют о существовании в объеме адгезионного соединения ПВФ₂ – ПММА двух «слабых слоев»: первый связан с наличием межфазной границы раздела, если $T_{\phi} <$ ВКТР, второй – со структурной организацией растворов ПВФ₂ с ПММА при $\omega_1 < 0,6$, для которых, вероятно, по аналогии с работой [17], характерна низкая степень кристалличности и повышенная деформируемость. Анализ структурно-морфологической картины (рис. 8) показывает, что в области $0,4 < \omega_1 < 0,7$ не наблюдается образования ламеллярных и сферолитовых структур, типичных для ПВФ₂ и его растворов с ПММА при $\omega_1 > 0,75$ (рис. 8, e). Эти результаты совпадают с распределением степени кристалличности ПВФ₂ по толщине адгезионного соединения, построенным по данным [18] и по приведенным выше концентрационным профилям. О повышенной деформируемости этого слоя свидетельствуют размеры и локализация «тяжей», образующихся в зоне разрушения адгезионного соединения (рис. 9).

Характер разрушения адгезионного соединения. О характере разрушения адгезионного соединения, как это следует из изложенного выше, во-первых, можно судить уже по результатам сравнения концентрационных профилей до и после разрушения адгезионного соединения, во-вторых, по данным анализа поверхности разрушения. Следует иметь в виду, что для корректного заключения о характере разрушения в адгезионных соединениях полимер – полимер нельзя ограничиться одним методом, если отсутствует информация о диаграмме фазового состояния исследуемой системы. Например, если известно, что полимерные компоненты адгезионного соединения несовместимы, то при определении характера разрушения можно ограничиться одним из структурно-морфологических или апаратических методов. Идентификация типа разрушения осложняется, когда субстрат и адгезив частично совместимы. Очевидно, что в этом случае требуется иной методологич-

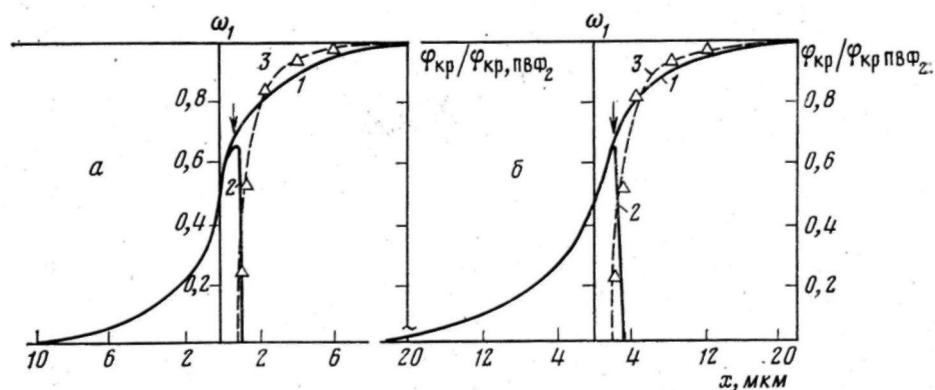


Рис. 7. Распределение концентрации (1, 2) и степени кристалличности (3) в области адгезионного соединения ПВФ₂ – ПММА: а – $T_f=200$, $t>\tau$; б – $T=250^\circ$, $t>\tau$. Кривые 1, 2 соответствуют направлению сканирования AA, 3 – направлению BB

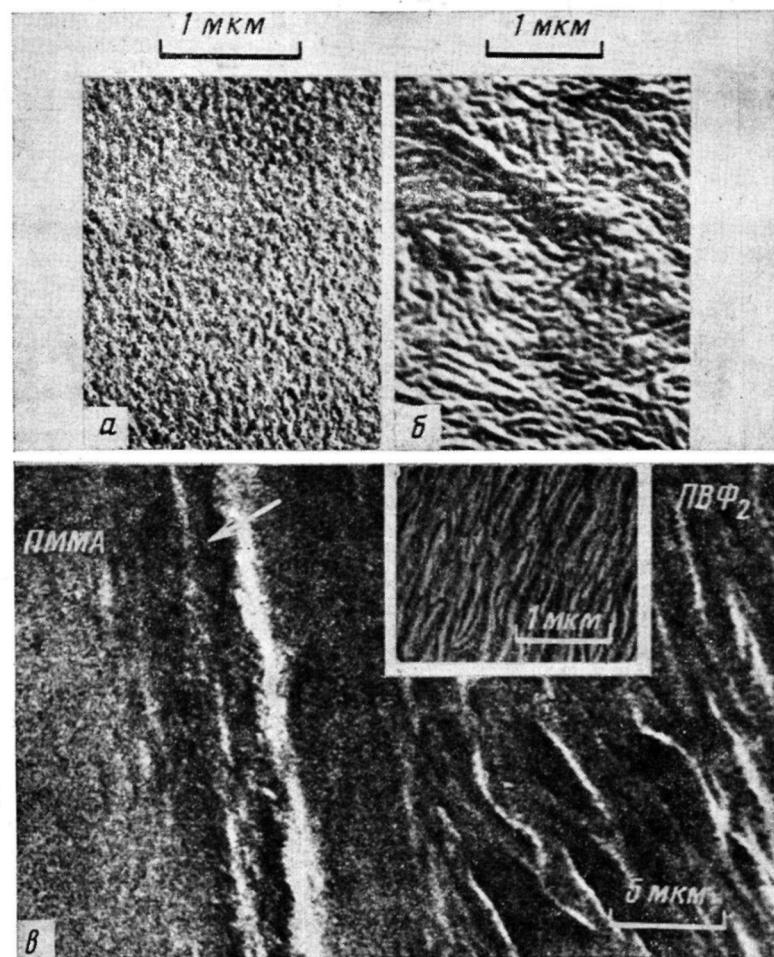


Рис. 8. Морфология поверхности травления ПММА (а), разреза (б) и среза адгезионного соединения (в). Стрелкой показано положение межфазной границы

ский подход. Действительно, в этом случае недостаточно показать, что на поверхности субстрата имеется «слой» адгезива, а именно эту информацию мы получаем, используя методы нарушенного полного внутреннего отражения ИК-спектроскопии, эллипсометрии, электронной спектроскопии для химического анализа, люминесценции. Поскольку межфазная граница в частично совместимых системах образована контактирующими между собой растворами макромолекул обоих компонентов,

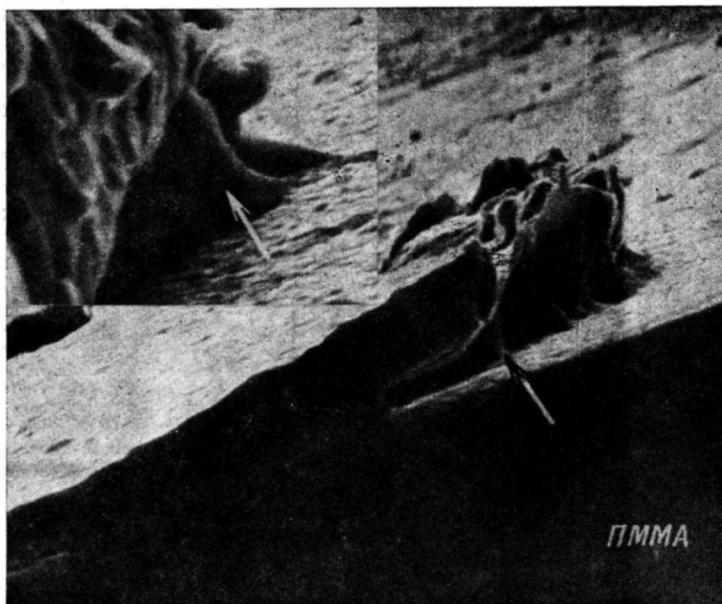
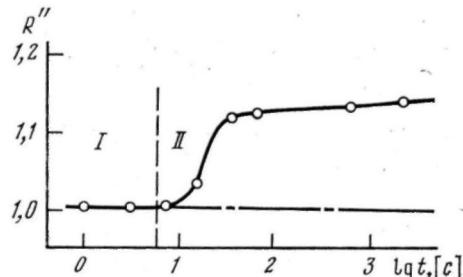


Рис. 9. Микрофотография участка когезионного разрушения соединения ПВФ₂ – ПММА

необходимо определить состав «слоя» – поверхностного слоя⁵ ($\omega_{1, \text{эксп}}$) и соотнести его с составами существующих фаз, следующих из диаграммы состояния. Если эта характеристика $\omega_{1, \text{эксп}} < \omega_1'$ ($\omega_{1, \text{эксп}} > \omega_1''$), то речь должна идти о когезионном характере разрушения соединения: при $\omega_{1, \text{эксп}} < \omega_1'$ по субстрату, при $\omega_{1, \text{эксп}} > \omega_1''$ по адгезиву.

В качестве количественной характеристики, определяющей характер разрушения адгезионного соединения, можно воспользоваться отношением эксперименталь-

Рис. 10. Зависимость R'' от времени формирования соединения при 200°: I – область адгезионного, II – когезионного разрушения



но найденного состава поверхности субстрата $\omega_{1, \text{эксп}}$ (или адгезива) после разрушения к ω_1' и ω_1'' : $R' = \omega_{1, \text{эксп}} / \omega_1'$, $R'' = \omega_{1, \text{эксп}} / \omega_1''$. Если $R' < 1$, то разрушение имеет когезионный характер и происходит по субстрату. Если $R' = 1$ ($R'' = 1$), то следует говорить об адгезионном характере разрушения. Наконец, если $R' > 1$ и $R'' > \omega_{1, \text{эксп}} / \omega_1''$ ($R'' > 1$), то разрушение имеет когезионный характер, но происходит по адгезиву. В случае применения электронно-зондового микроанализа эти соотношения следует записать в виде $R' = I_{\text{эксп}} / I$, где $I_{\text{эксп}}$ и I – интенсивность характеристического рентгеновского излучения, измеренная с поверхности разрушения и найденная из калибровочной зависимости $I - \omega_1$ для ПВФ₂. На рис. 10 показано, как изменяется характер разрушения адгезионного соединения ПВФ₂ – ПММА в зависимости от времени дублирования при 200°.

Высокая локальность электронно-зондового микроанализа в сочетании со сканирующей электронной микроскопией позволяют не только получать усредненные характеристики состава поверхности разрушения, но и проводить идентификацию различных структурно-морфологических образований, возникающих на поверхности разрушения. В качестве примера на рис. 11 приведены микрофотографии поверхности разрушения исследуемого нами адгезионного соединения в лучах K_α -линии характеристического рентгеновского излучения фтора. Можно видеть, что когезионное разрушение имеет фрагментарный характер, встречаются участки с большим и меньшим содержанием фтора, а также области, по своему локальному составу приближающиеся к ω_1'' . Очевидно, что обработка полученных результатов даст

⁵ Имеется в виду слой, фиксируемый тем или иным физическим методом анализа.

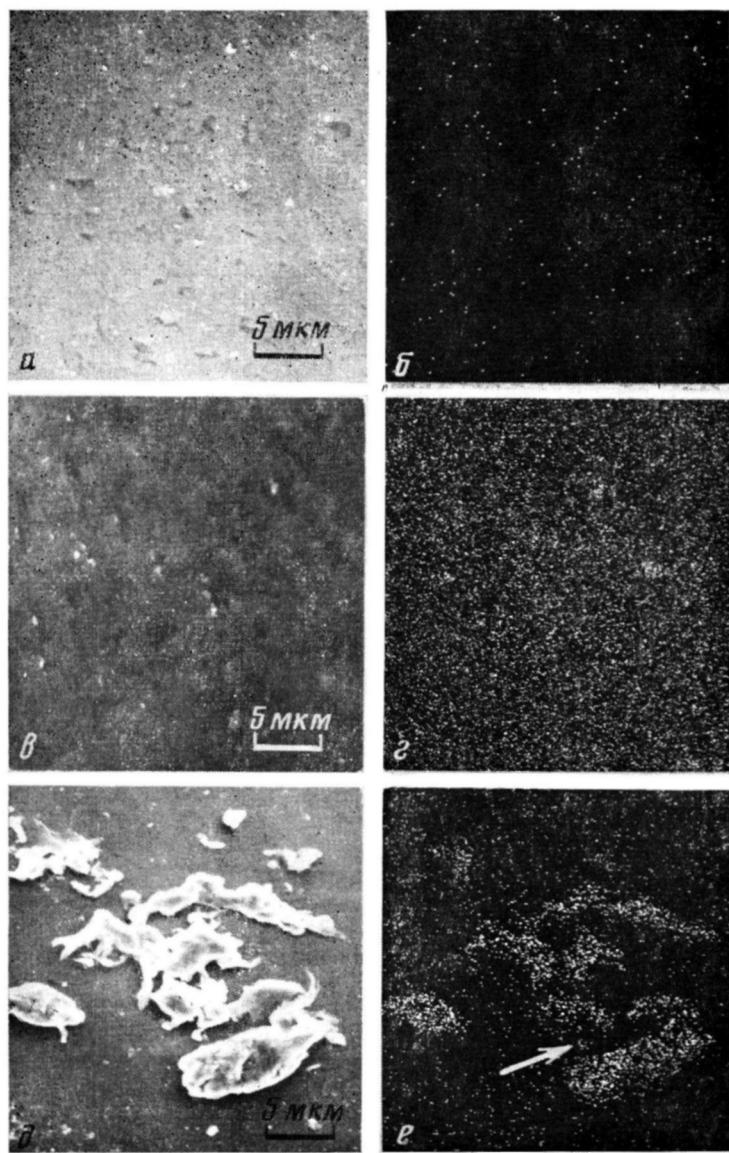


Рис. 11. Морфология поверхности исходного ПММА (а, б), ПВФ₂ (с, д) и субстрата ПММА (е, е) после разрушения соединения ($T_{\Phi}=200^{\circ}$, $t=300$ с). Изображение в отраженных электронах (а, с, д), в рентгеновских лучах K_{α} -линии фтора (б, е, е); в области, отмеченные стрелкой, характеризуют положение «вырванных» участков ПВФ₂

возможность оценить и такую характеристику, как степень неоднородности когезионного разрушения (см. вклейку к стр. 2193).

Таким образом, современная аналитическая электронная микроскопия позволяет при соответствующей вариации методов препарирования получать исчерпывающую информацию о структуре, характере разрушения, о фазовом состоянии адгезионной области в полимер-полимерных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марухин В. А. В кн.: Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия, 1977, т. 3, с. 947.
2. Руди М. Л. В кн.: Электронная микроскопия в минералогии / Под ред. Венка. М.: Мир, 1981, с. 457.
3. Матвеев В. В., Алиев А. Д., Сапожникова И. Н. В кн.: Полимер-полимерные композиции в народном хозяйстве (матер. семинара). М.: Знание, 1981, с. 12.
4. Чалых А. Е., Сапожникова И. Н. Высокомолек. соед. Б, 1980, т. 22, № 11, с. 835.
5. Price F. P., Gilmore R. T., Tkkmotis E. L. J. Polymer Sci. Polym. Symp. 1978, № 63, р. 33.
6. Алиев А. Д. В кн.: Докл. III конф. Диффузионные явления в полимерах. Рижск. политехн. ин-т, Рига: 1977, т. 1, с. 12.
7. Чалых А. Е. В кн.: Полимер-полимерные композиции в народном хозяйстве (матер. семинара), М.: Знание, 1981, с. 7.
8. Чалых А. Е., Сапожникова И. Н. Высокомолек. соед. Б, 1981, т. 23, № 3, с. 169.
9. Берлин А. А., Басин В. Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1969, с. 9.
10. Ву С. В кн.: Полимерные смеси / Под ред. Поля Д., Ньюмон С. М.: Мир, 1981, с. 283.
11. Липатов Ю. С. Межфазные явления в полимерах. Киев: Наукова думка, 1980, с. 228.
12. Кулезнев В. Н. Смеси полимеров. М.: Химия, 1980, с. 152.
13. Роджерс К. В кн.: Проблемы физики и химии твердого состояния органических соединений. М.: Мир, 1968, с. 318.
14. Girifalco L. A., Good R. J. J. Phys. Chem., 1960, v. 61, p. 561.
15. Ван-Кревелен Д. В. Свойства и химическое строение полимеров. М.: Химия, 1976, с. 103.
16. Bikermann J. J. The Science of Adhesive Joints. N. Y.: Acad. Press, 1968.
17. Гуль В. Е. Структура и прочность полимеров. М.: Химия, 1978.
18. Nishi T., Wang T. Macromolecules, 1975, v. 8, № 6, p. 909.

Институт физической
химии АН СССР

Поступила в редакцию
2.IV.1982

ANALYTIC ELECTRONIC MICROSCOPY IN STUDY OF ADHESIONAL COMPOUNDS

Чалых А. Е., Алиев А. Д., Рубцов А. Е.

Summary

The data on the structure and concentrational profiles in adhesional zone of PVF₂ – PMMA system are presented as well as data on mutual solubility of components, kinetics of attaining of limiting concentrations and on presence of diffusional streams. The regularities of spreading of a crack in the volume of adhesional compounds are discussed and the character of fracture is determined.

УДК 541.64:532.72

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ И АДСОРБЦИИ ТВЕРДЫХ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ В НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРАХ

Гришин Б. С., Ильина Е. А., Титова И. В.

Предложен экспериментальный метод оценки скорости растворения коэффициента диффузии и адсорбции низкомолекулярных ингредиентов в наполненных эластомерах. Метод основан на сопоставлении длительности движения двух различных степеней растворения, определяемых оптически по величине радиуса растворяющей гранулы. Метод проиллюстрирован на примере растворения сульфенамида Ц в СКИ, наполненном техническим углеродом.

Процессы диффузии и растворения ингредиентов представляют интерес для различных областей физикохимии каучуков и имеют большое практическое значение. Это обусловлено в последнее время появление ряда фундаментальных исследований, устанавливающих взаимосвязь кинетических закономерностей этих процессов со структурой и свойствами твердых низкомолекулярных веществ и эластоме-