

УДК 541.64:542.954

ВЛИЯНИЕ ПОЛИАРИЛЕНЭФИРКЕТОНОВ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ НА АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИАМИННОГО СВЯЗУЮЩЕГО¹

© 2007 г. А. С. Волков*, Ю. А. Горбаткина**, И. Ю. Горбунова*,
М. Л. Кербер*, С. Н. Салазкин***, В. В. Шапошникова***

*Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева
125047 Москва, Миусская пл., 9

**Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук
119991 Москва, ул. Косягина, 4

***Институт элементоорганических соединений
имени А.Н. Несмеянова Российской академии наук
119991 Москва, ул. Вавилова, 28

Поступила в редакцию 27.07.2006 г.
Принята в печать 22.11.2006 г.

Методом вытягивания определена адгезионная прочность на границе раздела биполимерная смесь—волокно. В качестве адгезивов использованы смеси эпоксидной смолы с термостойкими линейными термопластами — полиариленэфиркетонами различной молекулярной массы и химического строения, а в качестве подложки — стальная проволока диаметром 150 мкм. Установлено, что при введении в эпоксидную смолу 5–20 мас. % полиариленэфиркетонов адгезионная прочность увеличивается на 10–20%; резкий рост адгезионной прочности (на 50–80%) наблюдается при содержании модификатора 30%. Введение в композицию эпоксидная смола—полиариленэфиркетон наночастиц (Na^+ -монтмориллонит) повышает прочность сцепления со стальной проволокой. Обсуждены возможные причины наблюдаемых изменений адгезионной прочности.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы весьма интенсивно исследуют смеси реактопластов с термостойкими термопластами [1, 2]. Предполагалось, что использование таких смесей в качестве матриц в волокнистых композитах решит проблему получения материалов, обладающих не только высокой прочностью и жесткостью, но и высокой вязкостью разрушения и постударными характеристиками.

Модификация реактопластов (прежде всего эпоксидов) термопластами рассматривают как альтернативу модификации каучуками, введение которых, как известно [3, 4], во многих случаях позволяет повысить трещиностойкость

материалов, но одновременно понижает их модуль упругости, термо- и теплостойкость, а также окислительную стабильность.

В качестве модификаторов реактопластов используют полисульфоны, полиэфирсульфоны, полиэфирины, полиариленсульфоны, полиэфирэфиркетоны и т.п.

Чаще всего в работах, посвященных улучшению свойств смесей реактопласт–термопласт, основное внимание уделяется проблемам совместимости, эволюции фазовой структуры и морфологии [5, 6]. Наименее изученной остается адгезия смесевых композиций к твердым телам, в частности к волокнам. Изучению этой проблемы посвящен целый ряд работ [7–9], в которых была исследована адгезия смесей эпоксидная смола–жесткоцепной термопласт (полиэфирины, полисульфон) и полисульфон–ЖК–полиэфир к волокнам различной химической природы.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 04-03-33059).

E-mail: alexvolkoff@inbox.ru (Волков Александр Сергеевич).

Таблица 1. Некоторые характеристики используемых полиариленэфиркетонов

Полиарилен-эфиркетон	$M \times 10^{-3}$	Приведенная вязкость $\eta_{\text{пр}}$, дл/г (растворитель)	Температура начала размягчения, °C
ПАЭК-21Н	29	0.39 (CHCl_3)	210*
ПАЭК-21В	73	0.66 (CHCl_3)	235**
ПАЭК-22	—	0.56 (ДМАА)	260
ПАЭК-22-21	36	0.48 (ДМАА)	215–220*, 240**
ПАЭК-41	—	0.40 (ДМАА)	215

* Нагрузка на пуансон $P = 1000$ и ** 10 H/m^2 .

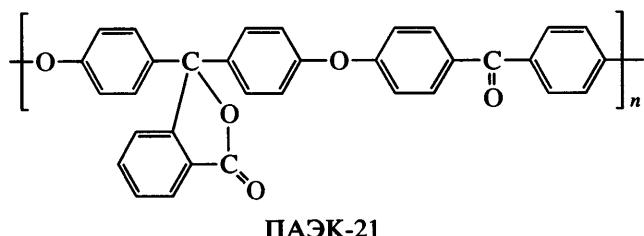
В настоящей работе исследованы адгезионные свойства смесей эпоксидная смола–полиарилен-эфиркетон.

Полиариленэфиркетоны – термопласти, имеющие очень высокую термо- и теплостойкость, характеризующиеся высокой удельной вязкостью разрушения, трещино- и ударостойкостью. Их выбор в качестве модификаторов определяется перспективностью для получения теплостойких композитов с высокими эксплуатационными свойствами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

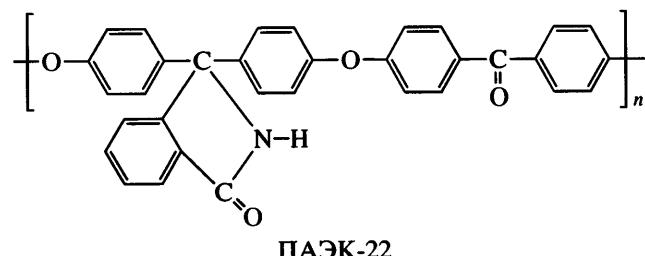
В работе исследовали смеси эпоксидного связующего марки ЭД-22 с полиариленэфиркетонами (ПАЭК) разной молекулярной массы и химического строения, синтезированными в ИНЭОС РАН; отвердителем служил 4,4'-диаминодифенилсульфон (ДАДФС). Некоторые характеристики различного вида ПАЭК представлены в табл. 1.

ПАЭК-21 – термопластичный прозрачный кардовый гомополимер, от темно-желтого до красно-коричневого цвета, получаемый по реакции поликонденсации 4,4'-дифторбензофенона с 3,3-бис-(4'-гидроксифенил)фталидом в ДМАА в присутствии K_2CO_3 [10, 11]:



Монолитные образцы полимера в виде кусочков пленки толщиной 300–400 мкм либо вспененных чешуек получали поливом из раствора на подложку. В зависимости от условий поликонденсации были приготовлены образцы ПАЭК-21 с различной приведенной вязкостью $\eta_{\text{пр}} = 0.39$ дл/г (ПАЭК-21Н) и 0.68 дл/г (ПАЭК-21В).

ПАЭК-22 – гомополимер на основе 4,4'-дифторбензофенона и имида фенолфталеина, содержащий фталимидные группировки, выделен в виде белого дисперсного порошка [12]:



ПАЭК-22-21 – сополимер на основе 4,4'-дифторбензофенона и смеси 3,3-бис-(4'-гидроксифенил)фталида и 3,3-бис-(4'-гидроксифенил)фталимида с фталидными и фталимидными группировками в соотношении 0.75 : 0.25.

Сополимер представляет собой прозрачную пленку толщиной 200–300 мкм или вспененные чешуйки светло-коричневого цвета, полученные методом полива из раствора в хлороформе.

ПАЭК-41 – гомополимер на основе 4,4'-дифторбензофенона и фенолфталеина, содержащий активные карбоксильные группы, представляет собой мелкодисперсный порошок белого цвета [13]:



Все ПАЭК при комнатной температуре растворимы в хлороформе, диэтиленгликоле и не растворимы в воде. Некоторые из ПАЭК растворимы в ЭД-22 при нагревании до 115–120°C, а

некоторые при нагревании взаимодействуют с ней с образованием частично сшитых структур.

M_w измеряли методом рассеяния света на фотогениодиффузометре "Fica" при температуре 25°C и длине волны $\lambda = 546$ нм в вертикально поляризованном свете, используя двойную экстраполяцию по Зимму (растворитель хлороформ). Калибровку прибора осуществляли по бензолу. Значение dn/dc , равное 0.248, вычисляли на рефрактометре типа Пульфриха с дифференциальной кюветой.

Значения приведенной вязкости η_{sp} полимеров определяли в вискозиметре Оствальда при 25°C (0.5 г полимера в 100 мл хлороформа или ДМАА).

Термомеханические испытания ПАЭК проводили по методике [14]; за температуру начала размягчения принята температура, соответствующая точке пересечения касательных к участкам термомеханической кривой в области начала течения. Для оценки термомеханических свойств образцов в виде пленки и перерабатываемости исследованных материалов использовали плоскостной пластометр ПП-1 [15].

В работе исследовали немодифицированную композицию, состоящую из 70 мас. % эпоксидного олигомера ЭД-22 и 30 мас. % ДАДФС, и ту же композицию, в которую вводили 5, 10, 15, 20 и 30% от массы эпоксидного олигомера ПАЭК.

В навеску эпоксидной смолы добавляли необходимое количество модификатора, смесь тщательно перемешивали и подогревали при 130°C в течение суток и более до полного растворения модификатора в смоле.

Такую высокую температуру для изготовления смеси выбрали потому, что все виды ПАЭК не растворимы в ЭД-22 при комнатной температуре и начинают растворяться лишь при 115–120°C. В горячую смесь с растворенным модификатором (ПАЭК) добавляли порошкообразный отвердитель (ДАДФС), и всю массу охлаждали до комнатной температуры при постоянном и тщательном перемешивании. При изготовлении не-

модифицированной композиции в навеску ЭД-22 вводили 30 мас. % ДАДФС при комнатной температуре и смесь тщательно перемешивали.

Максимальное количество ПАЭК, которое удалось ввести (растворить) в эпоксидную смолу, зависело от его химического строения. При использовании ПАЭК-21 и ПАЭК-22-21 это количество достигало 30 мас.%; при введении ПАЭК-41 и ПАЭК-22 – всего 10–15 мас.%. При больших количествах модификатора системы теряли текучесть и не переходили в вязкотекущее состояние даже при нагревании их до 180°C (т.е. до температуры формирования адгезионных соединений).

Отметим, что в интервале температур, которые использовали для приготовления композиций (100–180°C), возможно взаимодействие оксиранных циклов эпоксидных олигомеров с боковыми функциональными группами ПАЭК: с карбоксильной группой ПАЭК-41 и с фталимидной группой ПАЭК-22 и ПАЭК-22-21, причем с ПАЭК-41 взаимодействие происходит более интенсивно.

Используемые полимерные системы при комнатной температуре представляют собой весьма вязкие системы, поэтому при заливке связующего в чашечки (при изготовлении адгезионных соединений) его периодически подогревали в термошкафу при 100–120°C, но не более 5 мин, чтобы не допустить нарастания вязкости из-за быстрого отверждения. Режим термообработки адгезионных соединений для всех рассматриваемых систем был установлен заранее (отверждение при 180°C в течение 5.5 ч без применения давления в воздушной атмосфере). Выбранный режим позволил получить хорошо сформированную границу раздела и обеспечить хорошую воспроизводимость результатов. Для ПАЭК, полученных в виде пленок, адгезионные соединения со стальной проволокой удалось получить при помощи краткого одновременного воздействия давления и высокой температуры.

Во всех опытах субстратом в соединениях служила стальная проволока. Ее высокая прочность позволила избежать при нагружении соединений их когезионного разрушения и тем самым уменьшить число испытываемых образцов.

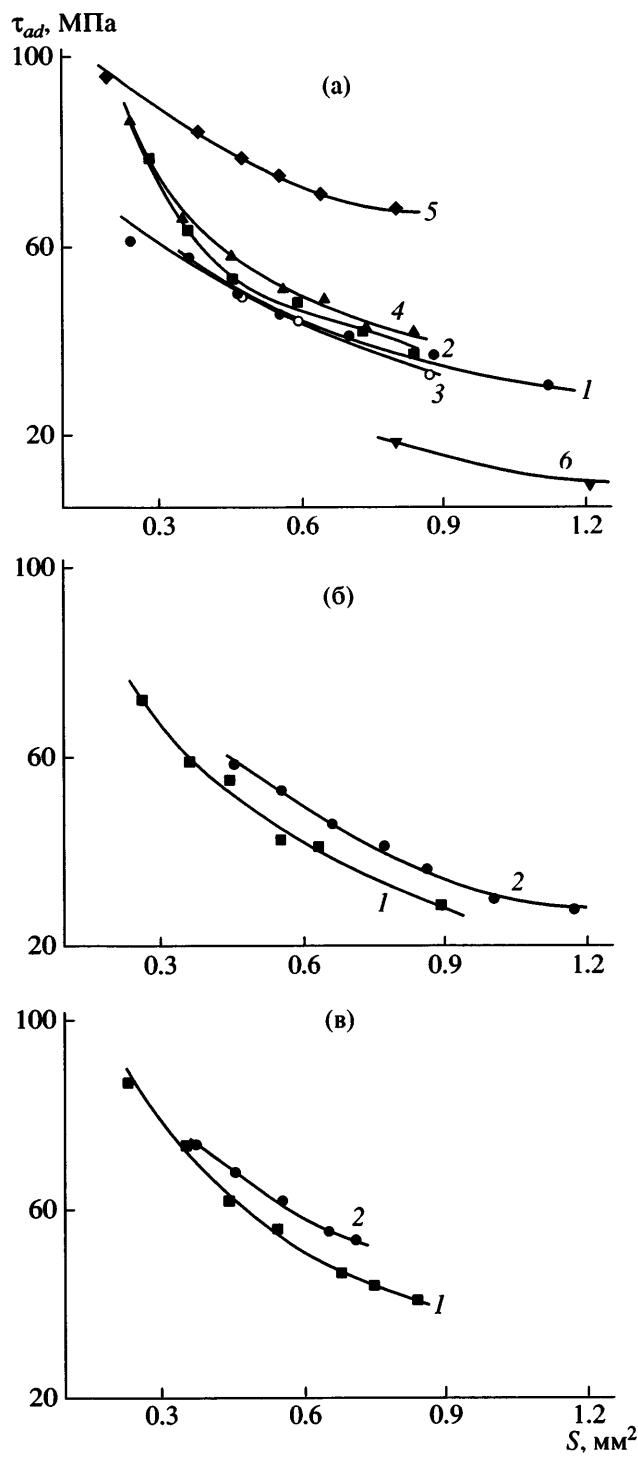


Рис. 1. Зависимость адгезионной прочности от площади соединений для систем (ЭД-22–ДАДФС–полиариленэфиркетон)–стальная проволока диаметром 150 мкм при различном содержании модификаторов. а: [ПАЭК-22-21] = 0 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4) и 30 мас. % (5), 6 – чистый ПАЭК-22-21; б: [ПАЭК-41] = 5 (1) и 10 мас. % (2); в: [ПАЭК-21В] = 10%, для кривой 2 – система ЭД-22–ДАДФС–полиарилен-эфиркетон с добавкой 10% от массы ЭД-22 Na⁺-монтмориллонита.

Для оценки адгезионных свойств эпоксиполи-ариленэфиркетоновых смесей методом “pull-out” оценивали прочность их соединений со стальной проволокой [16].

Образцы испытывали на усовершенствованной модели адгезиометра МАВ-2ТС (микроразрывная машина, разработанная в ИХФ РАН [16]). При этом записывали диаграмму нагружения, из которой определяли усилие F , необходимое для выдергивания волокна из слоя адгезива. Измерения проводили при постоянной скорости нагружения, равной 1 Н/с.

Адгезионную прочность τ_{ad} для каждого испытываемого образца рассчитывали по формуле

$$\tau_{ad} = F/S, \quad (1)$$

где $S = \pi d l$ – площадь адгезионного соединения (площадь контакта смолы и волокна), d – диаметр стального волокна, равный 150 мкм, l – толщина слоя адгезива.

Толщину слоя полимера находили после разрушения адгезионного соединения. При этом использовали микрометр с двумя конусными вставками МВМ. Так как при смачивании волокна адгезивом всегда образуются мениски, высоту слоя полимера измеряли непосредственно над отверстием, остающимся после выдергивания волокна. Диаметр площади опоры конических вставок 1–2 мм. Использование такой малой площади опоры позволяет избежать ошибок за счет неровности полимерного слоя.

Площадь S исследованных адгезионных соединений изменялась в интервале 0.2–1.3 мм^2 . При обработке результатов этот интервал делили на субинтервалы с одинаковой площадью $\Delta S = 0.1 \text{ мм}^2$. Для каждого субинтервала рассчитывали соответствующие средние значения \bar{F} и $\bar{\tau}_{ad}$, которые использовали для построения зависимостей $\tau_{ad} = f(S)$ (рис. 1). Каждая точка на кривых τ_{ad} – результат измерения 15–25 образцов. Подробно методики измерения адгезионной прочности в системах полимер–волокно и обработки результатов описаны в работе [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из рис. 1 следует, что адгезионная прочность τ_{ad} монотонно понижается при увеличении пло-

щади контакта между полимером и волокном. Подобные кривые наблюдаются для всех исследованных пар. Зависимость прочности границы раздела в системах полимер—волокно от размеров соединений (масштабный эффект в адгезионной прочности), как известно, явление общее, связанное с неравномерным распределением сдвиговых (касательных) напряжений на межфазной границе волокно—полимер [16–18].

Результаты, полученные в настоящей работе для не исследованных ранее систем, подтверждают общность этой закономерности и соответственно причин, ее обуславливающих.

Типичные результаты, показывающие, как введение модификатора влияет на значения τ_{ad} , приведены на рис. 2. Видно, что при небольших (до 15 мас. %) количествах ПАЭК-22-21 прочность границы раздела меняется мало; существенные изменения наступают только при введении 30 мас. % термопласта: прирост τ_{ad} достигает при этом 60–80% в зависимости от размеров (геометрии) соединения. Адгезивы при такой концентрации модификатора непрозрачны, что свидетельствует о произошедшем в процессе отверждения фазовом расслоении эпокси полиариленэфиркетоновой смеси.

Аналогичные зависимости адгезионной прочности от концентрации модификатора наблюдаются и для системы с ПАЭК-21Н. При увеличении концентрации термопласта до 30 мас. % снова проявляется расслоение фаз и значительное (на 60–80%) возрастание адгезионной прочности. Это хорошо видно на рис. 2.

Как отмечено выше, при добавлении в эпоксидную смолу ПАЭК-41 удалось получить адгезионные соединения и исследовать адгезионную прочность только при небольшом (до 10 мас. %) количестве термопласта (рис. 1б). При такой концентрации рост межфазной прочности не превышал 13–20% (рис. 2). Адгезивы остаются при этом прозрачными, т.е. фазового расслоения смесей в процессе отверждения, видимо, не происходит.

Результаты, полученные для систем с ПАЭК-21В, хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [8]. В ней показано, что при модификации эпоксидановой смолы ЭД-20 (близкой по составу к ЭД-22) тем же полиариленэфиркетоном с $\eta_{sp} = 0.68$ дL/g адгезионная

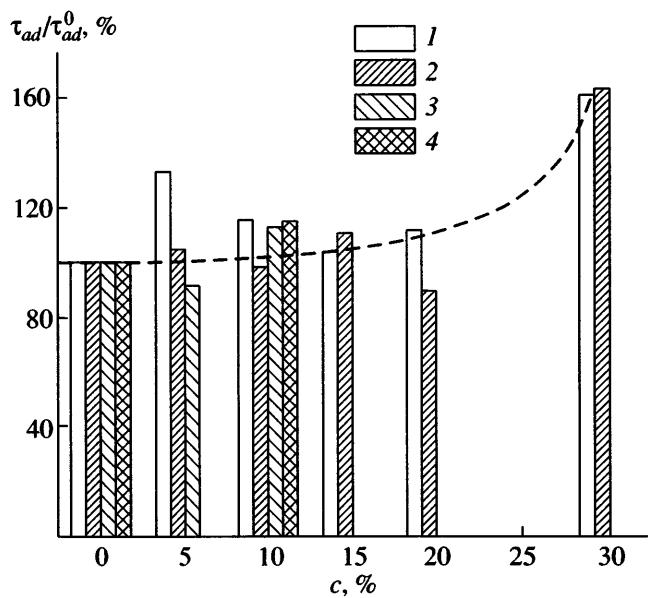


Рис. 2. Изменение относительного прироста адгезионной прочности от концентрации ПАЭК-21Н (1), ПАЭК-22-21 (2), ПАЭК-41 (3) и ПАЭК-21В (4) в системах биполимерная матрица—стальная проволока при введении ПАЭК в эпоксидановую смолу ЭД-22 при площади контакта $S = 0.6 \text{ мм}^2$; τ_{ad}^0 — адгезионная прочность немодифицированной ЭД-22.

прочность также увеличивалась только после того, как концентрация термопласта в смеси достигает 15 мас. %. Рост τ_{ad} не превышает 20–25%; фазового разделения (визуально) не наблюдается: адгезив остается прозрачным.

Попытки оценить адгезионные свойства полиариленэфиркетонов ПАЭК-22 и ПАЭК-41 к успеху не привели: для этих порошкообразных полимеров не удалось получить однородный расплав и соответственно сформировать соединение с качественной границей раздела.

При исследовании адгезионных характеристик самих модификаторов ПАЭК-21 и ПАЭК-22-21, полученных в виде пленок, оказалось, что адгезионная прочность соединений ПАЭК-21 (без химически активных групп) со стальной проволокой вне зависимости от ММ модификатора очень низка: 2–6 МПа. Адгезионная прочность ПАЭК-22-21, содержащего небольшое количество фталimidных групп, несколько выше (рис. 1а).

Рисунок 2 также показывает, что химическое строение вводимых полиариленэфиркетонов на

Таблица 2. Прирост адгезионной прочности при использовании в качестве адгезивов смесей эпоксид–жесткоцепной термопласт

Эпоксидная смола	Отвердитель	Модификатор	$c_{\max}^*, \%$	Интервал исследованных концентраций, %	$\Delta\tau_{ad}/\tau_{ad}^0, \%$	Литература
ЭД-20	ТЭАТ	ПСК-1 ($M = 60000$)	10	0–25	25–40	[22]
ЭД-20	ТЭАТ	Ультем-1000	15	0–20	25–30	[21]
ЭД-20	ДАДФС	ПАЭК-21	15	0–15	25–35	[9]
ЭД-22	ДАДФС	ПАЭК-21	30	0–30	60–80	Настоящая работа
ЭД-22	ДАДФС	ПАЭК-22-21	30	0–30	50–80	То же

Примечание. $\Delta\tau_{ad}/\tau_{ad}^0 = (\tau_{ad\max} - \tau_{ad}^0)/\tau_{ad}^0$, где $\tau_{ad\max}$ – максимальное значение τ_{ad} , которое удалось достичь, τ_{ad}^0 – значение τ_{ad} для соединений с немодифицированной эпоксидной смолой; величина $\Delta\tau_{ad}/\tau_{ad}^0$ зависит от размеров адгезионного соединения. ТЭАТ – триэтаноламинотитанат.

* Концентрация, при которой получено максимальное значение адгезионной прочности.

значения τ_{ad} оказывается мало: добавление небольшого количества (до 10–15 мас. %) любого из модификаторов – и ПАЭК-21, который не содержит химически активных функциональных групп, и ПАЭК-22-21 с активными фталимидаими группами, и ПАЭК-41 с фенилкарбоксильными группами – приводит к примерно одинаковому (10–15%) росту адгезионной прочности.

При малой концентрации ПАЭК повышение ММ модификатора также существенно не изменяет значений τ_{ad} , что видно при сравнении межфазной прочности образцов, в адгезивы которых добавлены высоко- и низкомолекулярный ПАЭК-21. При введении 10 мас. % ПАЭК-21 адгезионная прочность в обоих случаях возрастает всего на 13% (по сравнению с прочностью соединений, в которых использована немодифицированная эпоксидная смола). Некоторого повышения адгезионной прочности (при малой концентрации модификатора) удалось достичь, вводя в биполимерную матрицу наночастицы. На рис. 1в это продемонстрировано для системы с ПАЭК-21В. Видно, что рост адгезионной прочности составляет 10–15%. Причины такого повышения не ясны и требуют дальнейшего изучения.

Из результатов, приведенных на рис. 1а, следует, что в широком интервале концентраций адгезионная прочность эпоксиполиариленэфиркетоновых смесей изменяется немонотонно. Действительно, значения τ_{ad} в соединениях модификатор–

волокно намного ниже, чем в соединениях эпоксид–волокно. Наблюдаемая ситуация типична. В работах [19, 20], где систематизированы зависимости τ_{ad} – S для компонентов целого ряда биполимерных смесей, показано, что адгезионная способность модифицирующих добавок, если она вообще может быть измерена, как правило, ниже, чем у основного (модифицируемого) полимера. Это означает, что адгезионная прочность с добавлением минорного компонента должна уменьшаться. Однако на концентрационных зависимостях τ_{ad} смесей в ряде случаев существуют области, в которых адгезионная прочность с увеличением концентрации модификатора растет. В настоящей работе для двух из исследованных адгезивов ЭД-22 + ПАЭК-21Н и ЭД-22 + + ПАЭК-22-21, для которых удалось сформировать соединения в относительно широком (до 30 мас. %) интервале составов, характерна та же картина. Ранее при исследовании концентрационной зависимости адгезионной прочности смесей реактопласт–термопласт к волокнам мы тоже наблюдали немонотонное (по кривой с более или менее четким максимумом) изменение прочности границы раздела.

Для иллюстрации в табл. 2 приведены значения концентрации, при которых достигался максимум, и относительный прирост адгезионной прочности $\Delta\tau_{ad}/\tau_{ad}^0$. Видно, что добавляя в эпоксидные смолы различные жесткоцепные термо-

пласти, можно весьма значительно повысить прочность границы раздела связующее–волокно. Степень увеличения зависит от химической природы термопласта и фазового состояния смеси после отверждения. Максимальный эффект наблюдается при добавлении полиариленэфиркетонов. Из табл. 2 следует также, что максимальные значения τ_{ad} достигаются, как правило, при фазовом расслоении смесей. Прирост адгезионной прочности определяется при этом, по всей вероятности, морфологией приповерхностных (границающих с волокнами) слоев, которая в свою очередь влияет на процесс разрушения адгезионных соединений и тем самым на межфазную прочность. Отмеченные выше особенности подробно рассмотрены в работах [9, 19, 20].

Таким образом, результаты, приведенные в настоящей работе и в работе [8], показывают, что, используя эпоксиполиариленэфиркетоновые смеси, можно весьма значительно (на 50–80%) увеличить прочность границы раздела матрица–волокнистый наполнитель. Это позволило получить с помощью таких смесей волокнистые композиты с улучшенными физико-механическими характеристиками. Результаты исследования свойств подобных композитов будут опубликованы в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martinez M., Martin M.D., Eceiza A., Oyanguren P., Mondragon I. // Polymer. 2000. V. 41. № 8. P. 1027.
2. Saalbrink A., Mureau M., Peijs T. // Proc. 11 Int. Conf. Composite Materials (ICCM-11) / Ed. by Scott M.L. Sidney: Australian Composite Structures Soc., 1997. V. IV.
3. Ratna D. // Polymer. 2001. V. 42. № 6. P. 4209.
4. Козий В.В., Розенберг Б.А. // Высокомолек. соед. А. 1992. Т. 34. № 11. С. 3.
5. Чалых А.Е., Герасимов В.К., Бухтеев А.Е., Шапагин А.В., Кудрякова Г.Х., Бранцева Т.В., Горбаткина Ю.А., Кербер М.Л. // Высокомолек. соед. А. 2003. Т. 45. № 7. С. 1148.
6. Varley R.J., Hodgkin J.H., Hawthorne D.G. // Polymer. 2000. V. 41. № 10. P. 3425.
7. Gorbatkina Yu.A., Pankratov V.A., Frenkel Ts.M., Chernyshova A.G., Shvorak A.E. // J. Adhesion Sci. Technol. 1997. V. 11. № 7. P. 803.
8. Калаев Д.В., Бранцева Т.В., Горбаткина Ю.А., Кербер М.Л., Кравченко Т.П., Салазкин С.Н., Шапошникова В.В. // Высокомолек. соед. А. 2003. Т. 45. № 5. С. 779.
9. Brantseva T.V., Gorbatkina Yu.A., Mäder E., Dutschk V., Kerber M.L., Schneider K., Haßler R. // J. Adhesion Sci. Technol. 2004. V. 8. № 18. P. 1293, 1309.
10. Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Донецкий К.И., Горшков Г.В., Шарапов Д.С., Мамедова И.А., Петровский П.В., Аскадский А.А., Бычко К.А., Казанцева В.В., Краснов А.П., Афоничева О.В., Ткаченко А.С., Генина М.М. // Высокомолек. соед. А. 2002. Т. 44. № 6. С. 925.
11. Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Донецкий К.И., Горшков Г.В., Аскадский А.А., Бычко К.А., Казанцева В.В., Саморядов А.В., Краснов А.П., Лиознов Б.С., Афоничева О.В., Светлова Н.А., Коган А.С., Ткаченко А.С. // Высокомолек. соед. А. 1999. Т. 41. № 2. С. 217.
12. Салазкин С.Н., Донецкий К.И. // Докл. РАН. 1998. Т. 362. № 6. С. 789.
13. Донецкий К.И., Салазкин С.Н., Горшков Г.В., Шапошникова В.В. // Докл. РАН. 1996. Т. 350. № 2. С. 213.
14. Цетлин Б.Л., Гаврилов В.И., Великовская Н.А., Кочкин В.В. // Завод. лаб. 1956. Т. 22. № 3. С. 352.
15. Лиознов Б.С., Краснов А.П. Машины и приборы для испытания полимеров. М.: Металлургия, 1971.
16. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер–волокно. М.: Химия, 1987.
17. Ramaman Krishnamoorti, Koray Yurekli // Colloid Interface Sci. J. 2001. № 6. P. 46.
18. Kelly A., Macmillan N.H. Strong Solids. Oxford: Clarendon Press, 1986.
19. Горбаткина Ю.А. // Клеи, герметики, технологии. 2004. № 4. С. 18.
20. Горбаткина Ю.А. // Клеи, герметики, технологии. 2004. № 5. С. 24.
21. Бранцева Т.В., Горбаткина Ю.А., Кербер М.Л. // Механика композитных материалов. 2001. Т. 37. № 1. С. 3.
22. Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Кербер М.Л. // Механика композитных материалов. 1997. Т. 33. № 4. С. 433.

Effect of Poly(arylene ether ketone)s of Different Chemical Constitutions on Adhesion Properties of Epoxyamine Binder

A. S. Volkov^a, Yu. A. Gorbatkina^b, I. Yu. Gorbunova^a, M. L. Kerber^a,
S. N. Salazkin^c, and V. V. Shaposhnikova^c

^a Mendeleev University of Chemical Technology,
Miusskaya pl. 9, Moscow, 125047 Russia

^b Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
ul. Kosygina 4, Moscow, 119991 Russia

^c Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds, Russian Academy of Sciences,
ul. Vavilova 28, Moscow, 119991 Russia

e-mail: alexvolkoff@inbox.ru

Abstract—The adhesive strength on the bipolymer blend/fiber interface was determined by the pull-out method. Epoxy resin blends with heat-resistant linear thermoplastics, poly(arylene ether ketone)s of different molecular masses and chemical compositions, were used as adhesives, and a steel wire of 150 µm diameter was used as a substrate. It was found that the addition of 5–20 wt % poly(arylene ether ketone) to epoxy resin results in a 10–20% increase in the adhesive strength; a sharp gain in the adhesive strength (by 50–80%) is observed at a modifier content of 30%. The introduction of nanoparticles (Na^+ -montmorillonite) into the epoxy resin–poly(arylene ether ketone) blend increases the strength of adhesive bonding to steel wire. Possible reasons for the observed changes in the adhesive strength are discussed.