

*М. А. Вяткина^а, Ю. А. Горбаткина^а, И. Ю. Горбунова^с, Р. А. Корохин^а,
Н. Г. Павлюкович^{б,в}, Т. В. Петрова^а, В. И. Солодилов^{а*}, И. П. Сторожук^{б,в}*

^а*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН,
Москва, 119991 Россия*

^б*Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, Москва, 119991 Россия*

^в*Московский Государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва,
105005 Россия*

^с*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, 125047 Россия*

ВЛИЯНИЕ ОЛИГОМЕРНЫХ СОПОЛИИМИДОВ НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

*М. А. Vyatkina, Yu. A. Gorbatkina, I. Yu. Gorbunova, R. A. Korokhin, N. G. Pavlukovich,
T. V. Petrova, V. I. Solodilov*, I. P. Storozhuk*

EFFECT OF OLIGOMERIC COPOLYIMIDES ON THE PROPERTIES OF EPOXY BINDERS

Keywords: epoxy resin, oligomer copolyimides, viscosity, temperature constancy, adhesive strength of “matrix — fiber” joints.

The application ability of oligomeric copolyimides (OCPI) as epoxy resin modifiers of fiber-reinforced composites was investigated. For this purpose, the properties of epoxy resin compositions based on an ED-20 epoxy resin and iso-MTHPA modified by oligomeric copolyimides with terminal anhydride groups were studied. It is shown that the incorporation of OCPI into the ED-20 epoxy resin does not reduce manufacturability of the initial binder (viscosity of all binders is almost similar in composite formation conditions), increases the “binder-fiber” interface strength (the growth in the adhesive strength reaches 40%), and can slightly improve or reduce the heat capacity (the alteration in the glass temperature is ± 16 -22°C). The magnitude of the effects obtained depends on the amount of injected oligoimide amount and its structure. An analysis of the results obtained allows us to suggest that reactive oligomers can serve as modifiers of the epoxydiane resin in the production of fiber-reinforced structural plastics.

*Автор, с которым следует вести переписку: vital-yo@yandex.ru
Corresponding author: vital-yo@yandex.ru

Ключевые слова: смола эпоксидная, сополиимиды олигомерные, вязкость, теплостойкость, прочность соединений связующее—волокно адгезионная

Рассмотрена возможность применения олигомерных сополиимидов (СПИ) в качестве модификаторов эпоксидных смол, используемых для получения волокнистых композитов. Для этого изучены свойства эпоксидно-ангидридных композиций на основе эпоксидиановой смолы ЭД-20 и изо-МТГФА, модифицированных олигомерными сополиимидами с концевыми ангидридными группами. Показано, что введение СПИ в смолу ЭД-20 не ухудшает технологичности исходного связующего (в условиях формирования композитов вязкость всех связующих практически одинакова), повышает прочность межфазной границы связующее—волокно (рост значений адгезионной прочности достигает 40%), может ухудшать или улучшать теплостойкость (изменение температуры стеклования ± 16 — 22 °С). Величина достигнутых эффектов зависит от количества введённого олигоимида и его структуры. Анализ результатов позволяет утверждать, что реакционноспособные олигоимида могут служить модификаторами эпоксидиановых смол при получении армированных волокнами пластиков конструкционного назначения.

Введение

Эпоксидные смолы (ЭС) — одни из наиболее востребованных полимерных материалов, их используют в качестве заливочных электроизоляционных и герметизирующих компаундов, связующих в многочисленных композитных материалах различного функционального назначения, в виде клеев и защитных лакокрасочных покрытий [1—5]. Однако усадка этих смол относительно высока при отверждении, а в отверждённом состоянии — теплостойкость невысокая и высокая хрупкость [6—10]. Направленное регулирование свойств эпоксидных смол введением различных добавок или химическим модифицированием структуры позволяет свести указанные недостатки к минимуму и разрабатывать материалы, удовлетворяющие конкретным эксплуатационным требованиям. Одно из направлений модифицирования ЭС — создание связующих эпоксид—термопласт, в частности, с полисульфонами [10, 11], полиэфиримидами [12—14]. При этом термопласты используют как в виде полимеров (с относительно высокой молекулярной массой), так и олигомеров с концевыми реакционноспособными по отношению к ЭС группами [15]. Применение низкомолекулярных соединений с концевыми химически активными группами, содержащих элементарные звенья хорошо зарекомендовавших себя термопластов, облегчает совместимость этих соединений с эпоксидной смолой и делает процесс приготовления

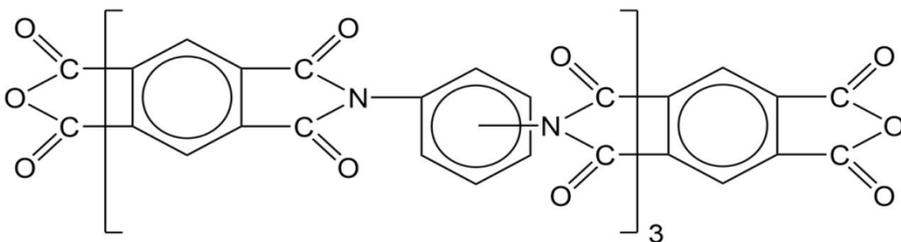
композиции более технологичным, а регулирование величины молекулярной массы олигомеров позволяет разрабатывать связующие с набором функциональных свойств.

В данной работе исследовано влияние модифицирования эпоксидиановой смолы горячего отверждения низкомолекулярными сополиимидами с концевыми реакционноспособными ангидридными группами. Выбор модификаторов связан с тем, что полиимиды, полиэфиримиды и сополиимиды разного химического строения и состава относятся к суперконструкционным термопластам, отличающимся высокой теплостойкостью и механической прочностью, а также хорошей адгезией к разным материалам. Благодаря комплексу своих эксплуатационных свойств эти полимеры находят широкое применение в различных отраслях промышленности, и для их производства имеется обширная сырьевая база [16—21].

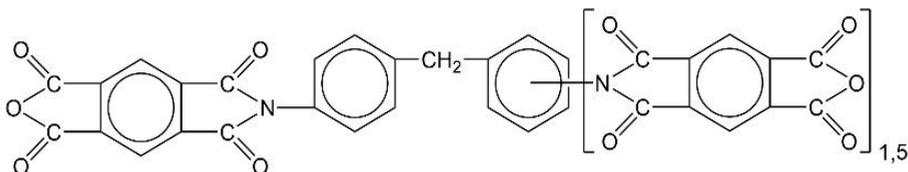
1. Материалы и методы

1.1. Объекты исследования. В качестве основы всех связующих использовали эпоксидиановую смолу ЭД-20. Отвердитель — *изо*-метилтетрагидрофталевый ангидрид (*изо*-МТГФА) (90% от массы смолы), ускоритель полимеризации — 2-метилимидазол (0,2% от массы смолы). В качестве модификаторов использовали реакционноспособные олигоимиды, синтезированные в Институте элементоорганических соединений РАН, представляющие собой порошки от светло-желтого до коричневого цвета. Структурные формулы модификаторов следующие:

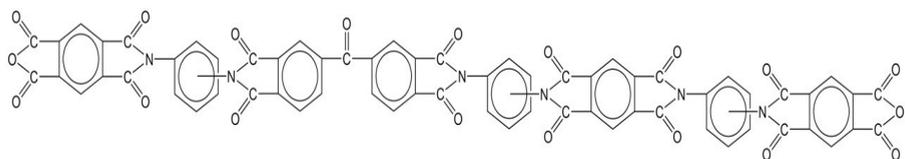
— СПИ-34 — олигомер на основе пиромеллитового диангидрида (ПМДА) и смеси *пара*- и *мета*-фенилендиамина



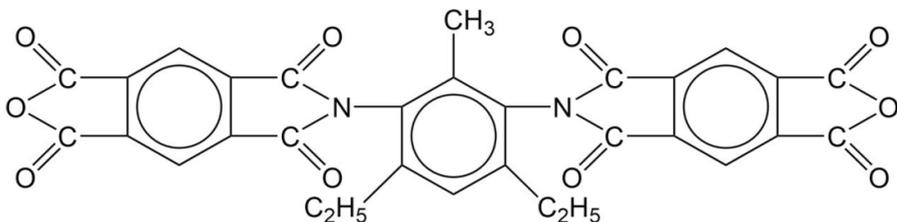
— СПИ-36 — синтезирован на основе смеси изомеров дифенилметандиизоцианата при избытке ПМДА



— СПИ-38 — сополиимид на основе смеси ПМДА и диангирида бензофенонтетракарбоновой кислоты



— ПДТА-2 — синтезирован на основе замещенного *meta*-фенилендиамина и диангирида пиромеллитовой кислоты



Все исследуемые олигоимиды растворимы в диметилформамиде, N-метилпирролидоне и при нагревании — в *изо*-МТГФА.

1.2. Приготовление смесей эпоксид—олигоимид. Олигоимиды растворяли при тщательном перемешивании в нагретом до 70 °С отвердителе. После растворения в *изо*-МТГФА получали прозрачные растворы от светло-жёлтого до тёмно-коричневого цвета. Охлаждённые до 20 °С растворы добавляли в смолу ЭД-20 комнатной температуры, содержащую ускоритель. Концентрация СПИ в получившемся связующем составляла 5—30% от массы смолы. Эти связующие использовали далее при проведении всех измерений.

Отметим, что при хранении в нормальных условиях смеси могут расслаиваться, поэтому их следует перемешивать непосредственно перед приготовлением образцов.

1.3. Измерение вязкости. Вязкость смесей измеряли методом ротационной вискозиметрии на реометре MCR 702 (AntonPaarGmbH, Австрия) с рабочей ячейкой конус—плоскость при температурах 20—80 °С. Угол между конусом и плоскостью 1°. Значение вязкости η , Па·с, определяли из формулы [22, 23]

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}},$$

где τ — напряжение при сдвиге, Па; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига, с⁻¹. Скорость сдвига варьировали от 30 до 410 с⁻¹.

1.4. Измерение температуры стеклования. Температуру стеклования T_g отвержденных образцов определяли с помощью дифференциальной

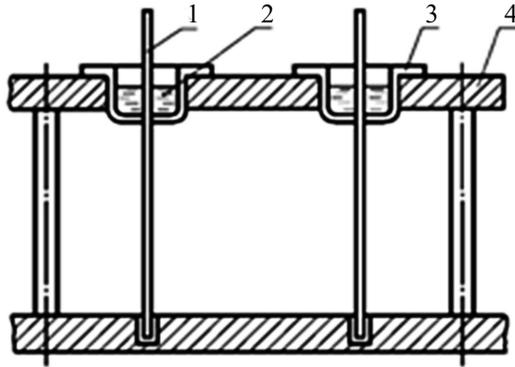


Рис. 1. Схема образца, используемого для определения адгезионной прочности соединений полимеров с волокнами диаметром $d \geq 80$ — 100 мкм методом выдёргивания (pull-out): 1 — волокно; 2 — полимер; 3 — алюминиевая чашечка; 4 — приспособление для приготовления образцов.

сканирующей калориметрии (ДСК). Измерения проводили на приборе NETZCH DSC 204F1 Phoenix при температуре 25 — 200 °С со скоростью нагрева 10 К/мин в среде аргона. Для исключения тепловой предыстории образцов в температурную программу ставили два нагрева и определяли температуру стеклования из термограммы второго нагрева. В качестве образцов использовали маленькие кусочки смолы (3 — 5 мг), которые откалывали от матриц, остающихся в алюминиевых чашечках после измерения адгезионной прочности (см. далее).

1.5. Определение адгезионной прочности соединений эпоксидное связующее—волокно. Адгезионную прочность определяли методом pull-out на модельных образцах, схема которых представлена на рис. 1. Подложкой во всех случаях служила стальная проволока ОВС-9 диаметром $d = 150$ мкм. Химический состав стального волокна ОВС-9: С — $0,67$ — $0,75$, Si — $0,17$ — $0,37$, Mn — $0,5$ — $0,8$, Fe — основа, Cr $\leq 0,25$, Ni $\leq 0,25$, S $\leq 0,035$, P $\leq 0,03$.

Полученные эпоксидолигоимидные смеси заливали в алюминиевые чашечки глубиной 3 — 5 мм и диаметром 8 мм. Образцы отверждали в термощкафу по ступенчатому режиму: 90 °С — 3 ч, 120 °С — 12 ч; от комнатной температуры до 90 °С и от 90 °С до 120 °С образцы нагревали со скоростью 1 град/мин; после термообработки образцы, оставаясь в формах, остывали вместе с термощкафом до комнатной температуры со скоростью 1 — 2 град/мин.

Сдвиговую адгезионную прочность τ образцов определяли по формуле

$$\tau = F / S,$$

где F — сила, необходимая для разрушения соединения (для сдвига

волокна относительно слоя заполимеризованного связующего); S — площадь адгезионного соединения, $S = \pi dl$; d — диаметр волокна; l — длина адгезионного соединения (длина участка волокна, погруженного в смолу). Значение F определяли на адгезиометре (микроразрывная машина, разработанная в ИХФ РАН [24, 25]); длину l измеряли микрометром с двумя конусными вставками.

При изготовлении образцов значения толщины слоя смолы в чашечках (длина контакта волокна со связующим) немного различались. Поэтому площадь склеек образцов оказывается распределённой в некотором интервале ΔS . При обработке результатов измерений интервал ΔS делили на субинтервалы, каждый площадью $0,1 \text{ мм}^2$. Для каждого субинтервала рассчитывали среднее значение разрушающей нагрузки F_{av} и сдвиговой адгезионной прочности τ_{av} образцов, чья площадь попадала в этот субинтервал, и строили зависимость величины τ от размеров соединений. Типичные кривые $\tau — S$ приведены на рис. 6. Подробно методика измерения адгезионной прочности описана в [24, 25].

2. Результаты и обсуждение

Для выяснения возможности использования предлагаемых олигоимидов в качестве модификаторов эпоксидных смол, применяемых в качестве связующих при производстве волокнистых композитов конструкционного назначения, было проверено, как добавление СПИ сказывается на вязкости и теплостойкости эпоксидов и на адгезионной прочности соединений связующее—волокно. Иными словами, как введение олигоимидов влияет на технологическое поведение связующих, их теплостойкость (у эпоксидов невысокая) и на прочность межфазной границы волокно—матрица, так как известно, что (при неидеальной адгезии) прочность однонаправленного композита изменяется симбатно с адгезионной прочностью. Заметное ухудшение хотя бы одного из трёх указанных параметров вызывает сомнение в целесообразности использования данных олигоимидов для модифицирования эпоксидиановых смол.

2.1. Влияние олигоимидов на вязкость связующих. Результаты измерения вязкости смесей η эпоксидная смола—реакционноспособный сополиимид представлены на рисунках 2—4. На рис. 2 показаны типичные зависимости вязкости η от скорости сдвига $\dot{\gamma}$. Видно, что при постоянной температуре (в интервале $20—80 \text{ }^\circ\text{C}$) значения η и немодифицированной, и модифицированных смесей остаются практически постоянными, т.е. все исследуемые смеси (связующие) — ньютоновские жидкости. Введение олигоимидов при всех значениях температуры повышает вязкость исходной смолы ЭД-20 (рис. 3). Зависимость $\ln \eta — C$ при всех температурах описывается прямыми, наклон которых уменьшается по мере роста температуры.

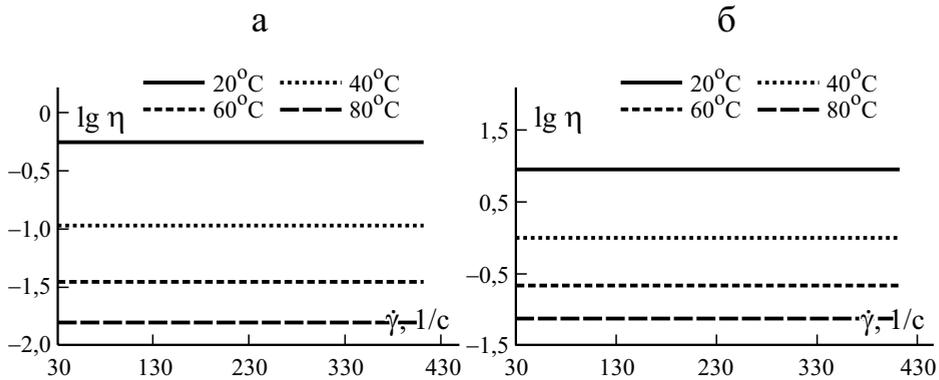


Рис. 2. Зависимость вязкости η эпоксиолигоимидных связующих — ЭД-20+изо-МТГФА (а) и ЭД-20+изо-МТГФА+20% по массе СПИ-38 (б) от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ при разной температуре в полулогарифмических координатах.

С повышением температуры от 20 °С до 80 °С вязкость падает больше, чем на порядок, у немодифицированной смолы ЭД-20 и на два порядка — у смесей с модификаторами (рис. 4). В результате того, что исходная смола ЭД-20 и связующие, в состав которых входят различные олигоимиды, с повышением температуры уменьшают свою вязкость по-разному, при 80 °С значения η оказываются практически одинаковыми (см. рис. 4—з).

Отметим, что держать смеси (связующие) при 70 °С и выше нельзя дольше ~15 мин, так как при более длительном прогреве начинается (становится заметным) отверждение смесей.

Полученные результаты позволяют утверждать, что модифицирование эпоксидной смолы ЭД-20 сополимерными олигоимидами не ухудшают

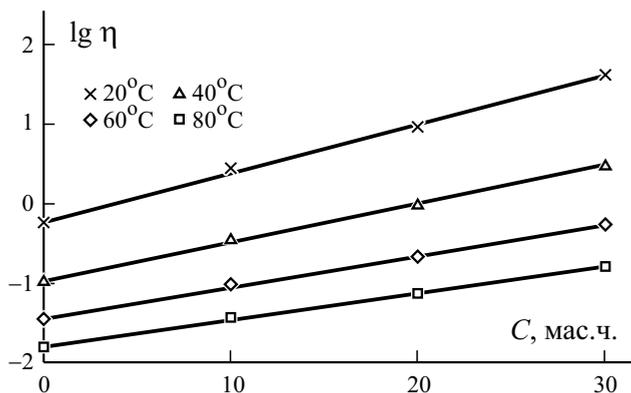


Рис. 3. Зависимость вязкости η от концентрации C олигоимида в смесях ЭД-20 + изо-МТГФА+СПИ-38 при разных температурах в полулогарифмических координатах. Скорость сдвига $\dot{\gamma} = 190 \text{ с}^{-1}$.

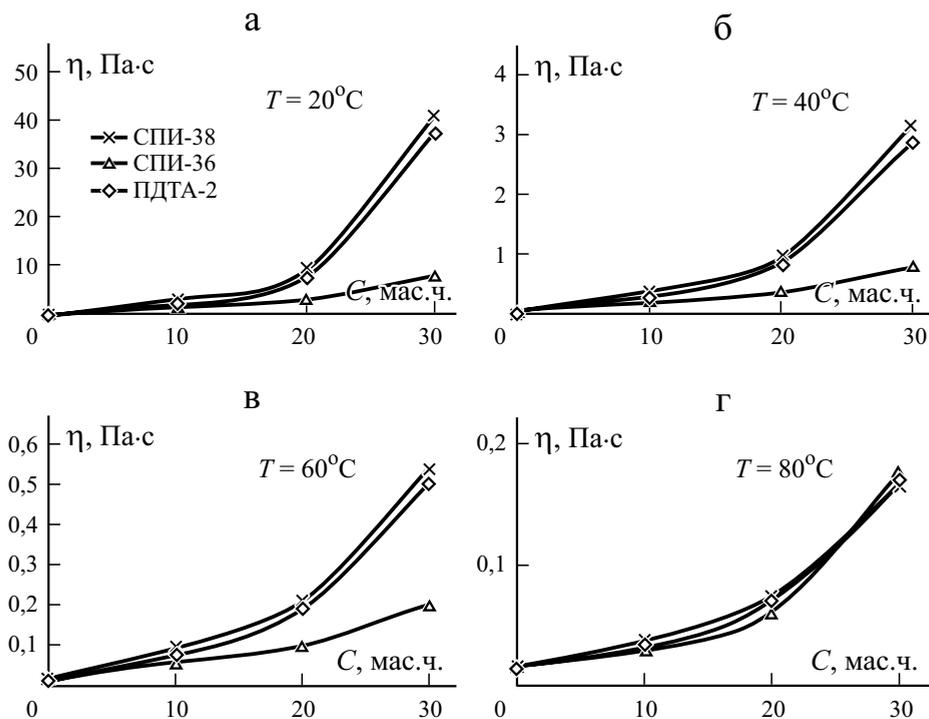


Рис. 4. Зависимость вязкости η от концентрации C олигоида в смесях ЭД-20+изо-МТГФА+олигоимид при разной температуре. Скорость сдвига 190 c^{-1} .

технологических возможностей связующих (по сравнению с исходной смолой). Хотя их вязкость при введении СПИ при комнатной температуре заметно растёт, она значительно интенсивнее падает с повышением температуры. Поэтому при создании однонаправленных композитов (например, методом намотки) при температуре выше комнатной ($50\text{—}60^\circ\text{C}$) значения вязкости всех связующих близки, и соответственно введение СПИ не требует изменения параметров технологического процесса.

2.2. Влияние количества введённых олигоимидов на теплостойкость эпоксидных связующих. Об изменениях теплостойкости эпоксидного олигомера при модифицировании его реакционноспособными олигоимидами судили по изменению температуры стеклования T_g отверждённых смесевых матриц. Значение T_g определяли по точке перегиба термограмм, полученных методом ДСК (рис. 5 и табл. 1). Из таблицы видно, что добавление 5% по массе модификатора для всех исследованных композиций увеличивает температуру стеклования эпоксидной матрицы. Рост значений T_g зависит от структуры используемого олигоида. Модификаторы СПИ-36 и ПДТА-2 повышают температуру стеклования несколько заметнее, чем СПИ-34 и СПИ-38: первые — на $15\text{—}16^\circ\text{C}$, вторые — на $8\text{—}12^\circ\text{C}$. Дальнейшее (свыше 5% по массе) увеличение концентрации олигоимидов

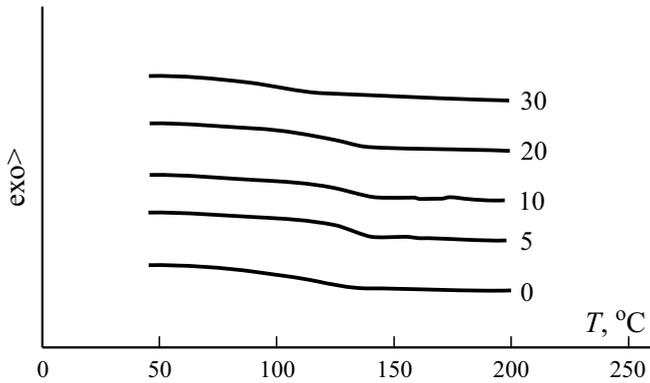


Рис. 5. Термограммы эпоксидных матриц, модифицированных СПИ-38. Цифры у кривых — содержание СПИ-38 в матрице (% по массе).

приводит к снижению температуры стеклования. Таким образом, концентрационная зависимость температуры стеклования эпоксидной смолы ЭД-20, модифицированной олигоимидами, во всех случаях описывается кривой с более или менее чётко выраженным максимумом. Как и максимальное значение T_g , так и его снижение при $C > 5\%$ по массе определяется строением олигоиоида. Например, модифицирование эпоксидной матрицы СПИ-34 приводит к практически линейному снижению значений T_g ; увеличение содержания СПИ-38 и СПИ-36 ведёт к более медленному снижению, но при концентрации $C = 30$ и 20% по массе соответственно значение T_g этих матриц становится ниже, чем исходной. И только олигоимид ПДТА-2 сохраняет повышенное значение температуры стеклования смесевых матриц (по сравнению со смолой ЭД-20) во всём интервале рассмотренной концентрации.

Таким образом, теплостойкость смесевых матриц (эпоксид + олигоимид) может быть и немного выше, и немного ниже теплостойкости исходной эпоксидной матрицы и зависит от структуры вводимого олигои-

Табл. 1

Температура стеклования T_g (°C) эпоксидных матриц, модифицированных олигоимидами

Модификатор	C, % по массе				
	0	5	10	20	30
СПИ-34	121	129	122	111	-
СПИ-36	121	137	126	95	96
СПИ-38	121	133	134	132	106
ПДТА-2	121	136	-	133	129

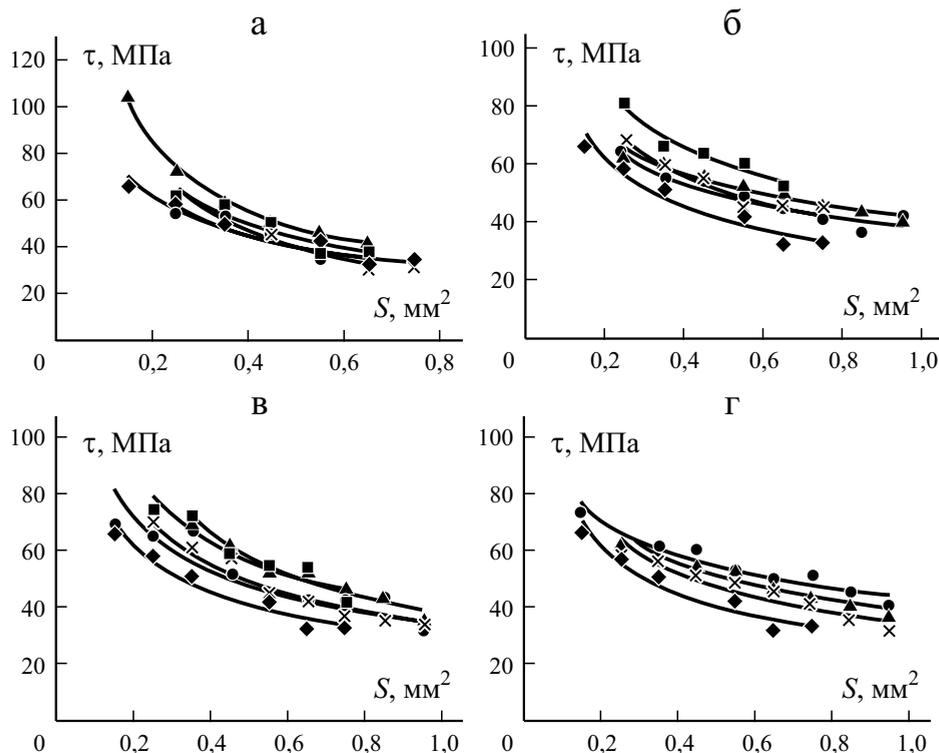


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности τ от площади соединений S для системы эпоксидная смола ЭД-20, модифицированная олигоимидами—стальная проволока ($d = 150$ мкм) при $C = 5$ (а); 10 (б); 20 (в); 30% по массе (г): ♦ — немодифицированная смола; ■ — СПИ-34; ▲ — СПИ-36; × — ПДТА-2; ● — СПИ-38.

мида и его концентрации. С чем связан подобный ход кривых $T_g - C$ пока не ясно. По всей вероятности, для ответа на этот вопрос нужно исследовать кинетику сополимеризации эпоксидов и олигоимидов.

2.3. Влияние количества введённых олигоимидов на прочность границы раздела эпоксидное связующее—волокно. Результаты, полученные при исследовании межфазной прочности смолы ЭД-20 в соединениях с волокнами, представлены на рис. 6. Отметим, что прочность сцепления исходного связующего с волокном только немного ниже полученной при отверждении смолы аминными отвердителями (например, триэтаноламином или триэтаноламинотитанатом) [18, 19].

Для всех исследованных систем значения адгезионной прочности τ зависят от размеров соединения, уменьшаясь с увеличением площади склейки S . Падение значений τ наиболее чётко выражено у соединений малых размеров ($S = 0,4 - 0,5$ мм²; $l/d \leq 5 - 7$). Таким образом, характер масштабной зависимости адгезионной прочности в новых исследуемых

Табл. 2.

Адгезионная прочность τ (МПа) соединений модифицированное олигоимидами эпоксидное связующее—стальная проволока ($d = 150$ мкм) при $S = 0,4$ и $0,6$ мм²

Модификатор	C, % по массе				
	0	5	10	20	30
$S = 0,4$ мм ²					
СПИ-34	49	51	-	66	-
СПИ-36	49	56	58	67	57
СПИ-38	49	48	54	57	59
ПДТА-2	49	50	55	55	54
$S = 0,6$ мм ²					
СПИ-34	38	39	-	52	-
СПИ-36	38	43	51	54	49
СПИ-38	38	36	45	46	52
ПДТА-2	38	35	44	44	47

системах ничем не отличается от такового в самых разнообразных изученных до сих пор адгезионных парах (когда измерение значений τ проводят ниже температуры стеклования адгезива).

Как известно [9, 18, 19], причина наблюдаемой масштабной зависимости адгезионной прочности — неравномерное распределение сдвиговых (касательных) напряжений на межфазной границе связующее—волокно. Эти напряжения складываются из внешних, прилагаемых к образцу при нагружении, и остаточных, возникающих в соединении во время его формирования и дальнейшего охлаждения ниже температуры стеклования связующего до температуры испытания. Характер зависимости τ — S определяется в основном температурными остаточными напряжениями.

Расположение кривых τ — S на рис. 6 свидетельствует о том, что введение любого из исследуемых олигоимида в связующее на основе смолы ЭД-20 улучшает прочность сцепления. Это не очень отчётливо видно при добавлении 5% по массе олигоимида (см. рис. 6—*a*) и вполне отчётливо — на рис. 6—*b*, *г*. Рост значений τ наблюдается для образцов любых размеров (см. табл. 2). Также ясно, что адгезионная прочность модифицированной смолы повышается с ростом количества введённого модификатора.

Из данных рис. 6 и табл. 2 следует, что увеличение адгезионной прочности зависит также от строения (структуры) используемого олигоимида.

Самой высокой адгезионной прочностью обладают смеси, содержащие 20% по массе СПИ-36. Для систем, содержащих СПИ-38 и ПДТА-2, максимум значений τ достигается при концентрации 30% по массе.

Увеличение прочности границы раздела может достигать 42% относительно чистой смолы.

Заключение

Исследование реологических, тепловых и адгезионных свойств эпоксициановой смолы ЭД-20, модифицированной олигомерными сополиимидами, показало, что эти композиции пригодны для использования в качестве связующих при создании армированных волокнами пластиков конструкционного назначения. Для получения связующих со стабильными оптимальными характеристиками требуется изучение их свойств в процессе отверждения.

Благодарность. Авторы благодарят Т. В. Антонову за помощь в экспериментах.

Работа выполнена по Государственному заданию ФИЦ ХФ РАН.

Работа посвящена 70-летию Лаборатории армированных пластиков ФИЦ ХФ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panda H.* Epoxy Resins Technology Handbook. — Asia Pacific Business Press Inc., 2017. — 576 p.
2. *Чурсова Л. В., Панина Н. Н., Гребенева Т. А., Кутергина И. Ю.* Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. — СПб.: ЦОП “Профессия”, 2020. — 576 с.
3. *Кочнова З. А., Жаворонок Е. С., Чалых А. Е.* Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты. — М.: Пейнт-Медиа, 2006. — 200 с.
4. *Еселев А. Д., Бобылев В. А.* Отвердители для клеев на основе эпоксидных смол // Клеи. Герметики. Технологии. — 2005. — № 4. — С. 2-8.
5. *Сорокин М. Ф., Кочнова З. А., Шодэ Л. Г.* Химия и технология пленкообразующих веществ. — М.: Химия, 1989. — 480 с.
6. *Михайлин Ю. А.* Специальные полимерные композитные материалы. — СПб.: НОТ, 2009. — 664 с.
7. *Кербер М. Л.* Полимерные композитные материалы. Структура. Свойства. Технологии. — СПб.: Профессия, 2008. — 560 с.

8. *Aguib S., Chikh N., Settet A. et al.* Experimental analysis of the tensile behavior of a hybrid composite beam with adjustable mechanical properties. // *Mech. Compos. Mater.* — 2021 — Vol. 57. No. 6. — P. 825—832.
9. *Sławski S., Kaczmarczyk J., Szymiczek M. et al.* Numerical studies on the influence of a reinforcing material on the energy absorption in a multilayered composite during impacts // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57, No. 3. — P. 309—320.
10. *Крыжановский В. К.* Производство изделий из полимерных материалов. — СПб.: Профессия, 2008. — 460 с.
11. *Горбаткина Ю. А., Иванова-Мумжиева В. Г.* Адгезия модифицированных эпоксидов к волокнам. — М.: Торус-пресс, 2018. — 216 с.
12. *Korokhin R. A., Shapagin A. V., Solodilov V. I., Zvereva U. G., Solomatin D. V., Gorbatkina Yu. A.* Epoxy polymers modified with polyetherimide. Part I: Rheological and thermomechanical characteristics // *Polym. Bulletin.* — 2021. — Vol. 78. — P. 1573—1584.
13. *Сопотов Р. И., Зюкин С. В., Горбунова И. Ю., Кербер М. Л., Дорошенко Ю. Е., Кравченко Т. П., Ильин В. И., Тузова С. Ю.* Рекинетика отверждения эпоксидного олигомера ЭД-20, модифицированного полисульфоном и полиэфиримидом // *Пласт. массы.* — 2015. — № 11—12. — С. 7—9.
14. *Бессонов М. И., Котон М. М., Кудрявцев В. В., Лайус Л. А.* Полиимиды — класс термостойких полимеров. — Л.: Наука, 1983. — 328 с.
15. *Кочергин Ю. С., Сторожук И. П., Кулик Т. А., Григоренко Т. И.* Сульфонсодержащие эпоксидные смолы // *Обзорн. инф. Сер. Эпоксидные смолы и материалы на их основе.* — М.: НИИТЭХИМ, 1990. — 47 с.
16. *Бородулин А. С., Калинин А. Н., Терешков А. Г., Музыка С. С.* Полиэфиримиды для создания термостойких полимерных композитных материалов с высокими физико-механическими свойствами // *Вест. БГТУ им. В. Г. Шухова.* — 2019. — № 11. — С. 94—100.
17. *Johnson R. O., Burlhis H. S.* Polyetherimide: a new high-performance thermoplastic resin // *J. Polym. Sci.: Polym. Symp.* — 1983. — Vol. 70. — P. 129—143.
18. *Parker D., Vussink J., Grampel H. T., Wheatley G. W., Dorf E. U., Ostlinning E., Reinking K., Schubert F., Junger O.* Polymers, High-Temperature // *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.* — Weinheim: Wiley, 2012.
19. *Alsaadi M.* A study on the delamination and flexural behavior of carbon- and aramid-fiber-reinforced epoxy composites with silicon carbide particle inclusions // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57, No. 6. — P. 847—856.
20. *Demircan G., Kisa M., Ozen M. et al.* Quasi-static penetration behavior of glass-fiber-reinforced epoxy nanocomposites // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57. No. 4. — P. 503—516.
21. *Abidi A., Salem S. B., Bezazi A. et al.* A Comparative study on the effect of milling and abrasive water jet cutting technologies on the tensile behavior of composite carbon/epoxy laminates // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57, No. 4. — P. 539—550.
22. *Малкин А. Я., Чалых А. Е.* Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. — М.: Химия, 1979. — 281 с.
23. *Шрамм Г.* Основы практической реологии и реометрии. — М.: КолосС, 2003. — 312 с.

24. *Горбаткина Ю. А.* Адгезионная прочность в системах полимер — волокно. — М.: Химия, 1987. — 192 с.

25. *Gorbatkina Yu. A.* Adhesive Strength of Fibre-Polymer Systems. — N. Y.; London; Toronto: ELLIS HORWOOD, — 1992. — 264 p.

Поступила в редакцию 20.04.2022

Окончательный вариант поступил 12.07.2022

Received Apr. 20, 2022 (July 12, 2022)
