

для всех типов подложки и определяется скоростью и механизмом роста.

4. Обнаружено появление гексагональной фазы в сочетании с обычной кубической структурой в пленках, осажденных на сколы поваренной соли. Появление гексагональной фазы зависит от температуры конденсации, скорости роста и типа подложки.

5. Показано, что на топологию поверхности пленок ZnS и ZnSe влияет механизм адсорбции, скорость роста и структура растущей пленки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавришук Е.М., Яшина Э.В. Оптические элементы из сульфида цинка и селенида цинка для инфракрасной техники // Оптический журнал. 2005. № 7. С. 56—59.

2. Гурин Н.Т., Шляпин А.В., Сабитов О.Ю. Кинетика электролюминесценции тонкопленочных излучателей на основе сульфида цинка на ультранизких частотах // Журнал технической физики. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 74—83.
3. Верещагин И.К., Ковалев Б.А., Косяченко Л.А., Кокин С.М. // Электролюминесцентные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1990. 168 с.
4. Крылов П.Н., Романов Э.А., Федотова И.В. Влияние термоотжига на структуру нанокристаллических пленок сульфида цинка // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. Вып. 1. С. 127—131.
5. Крылов П.Н., Романов Э.А. АСМ-исследования нанокристаллических пленок ZnS // Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11. № 2. С. 235—243.
6. Крылов П.Н., Романов Э.А., Ветoshкин В.М. Сверхвысоковакуумная установка для напыления нанокристаллических полупроводниковых соединений // Вакуумная техника и технология. 2008. Т. 18. № 2. С. 75—80.
7. Алялькин С.С., Крылов П.Н. Автоматизация серийной установки рентгеноструктурного анализа ДРОН-3 // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 2. С. 149—150.

МАТЕРИАЛЫ XXI ВЕКА

УДК 678.01.539.3:539.27

КИНЕТИКА ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И МИКРОСТРУКТУРА ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ В УГЛЕПЛАСТИКАХ НА ИХ ОСНОВЕ

В.Б. ЛИТВИНОВ¹, д-р техн. наук, М.С. ТОКСАНБАЕВ², канд. техн. наук, И.С. ДЕЕВ², канд. техн. наук, Л.П. КОБЕЦ³, д-р техн. наук, Д.Ю. РЯБОВОЛ³, В.А. НЕЛЮБ¹

¹ОАО Научно-производственный концерн «Композиционные материалы и технологии», e-mail: mail@emtc.ru

²ФГУП «ВИАМ», e-mail: admin@viam.ru

³ОАО «НИАТ», e-mail: niat3.10@gin.ru

Исследованы реокинетические характеристики эпоксидных связующих и углепластиков на их основе. По результатам их анализа выбрано связующее, наиболее пригодное для RTM-технологического процесса. Изучение микроструктуры матриц в углепластиках показало, что они относятся к коллоидно-дисперсным системам, находящимся в неравновесном состоянии. Незавершенность фазового расслоения в исследованных матрицах, отвержденных по стандартным режимам, является причиной нестабильности механических свойств углепластиков и конструкций на их основе при хранении и эксплуатации. Сложную микроструктуру матрицы М-21 можно отнести к супрамолекулярной, существенно повышающей трещиностойкость и ударопрочность композиционного материала.

Ключевые слова: кинетика отверждения, эпоксидные связующие, углепластики, микроструктура, гелеобразование, стеклование, дисперсные частицы, дисперсионная среда.

Введение

Углеродные волокна (УВ), появившиеся в середине XX века, к настоящему времени нашли устойчивое применение в аэрокосмической промышленности, автомо-

билестроении, энергетике, железнодорожном транспорте и других отраслях мировой экономики, что обусловлено удачным сочетанием таких уникальных свойств, как высокие прочность и модуль упругости, низкая плотность, способность выдерживать воздействие высоких

температур, коррозионная стойкость в различных агрессивных средах и многие другие. Мировое производство УВ в 2010 г. приближается к 60 тысяч тонн в год.

Полимерные композиты на основе углеродных волокон — углепластики (УП) изготавливают преимущественно с применением термореактивных эпоксидных связующих, обладающих высокой адгезией к поверхности волокон, высокой когезионной прочностью, технологичностью. Однако требуемые свойства УП достигаются только в случае реализации оптимального режима отверждения полуфабриката. Для определения параметров этого процесса необходимы предварительные исследования кинетики отверждения связующего, что и явилось одной из задач предлагаемой работы. Следует отметить, что эпоксидные связующие относятся к коллоидно-дисперсным системам [1,2], фазовое разделение в которых наблюдается уже на стадиях приготовления и хранения связующего. Важным следствием этого процесса является изменение начального соотношения компонентов связующего в различных фазах, при этом значительная часть отвердителя и (или) катализатора, специальных добавок, отличающихся более низким порогом растворимости, концентрируется в дисперсных частицах. Это приводит к различной степени отверждения полимера в частицах дисперсной фазы и дисперсионной среде, которая отверждается не полностью. Армирующий наполнитель активно влияет на фазовое разделение в связующем, ускоряя (стекло- и полиарамидное волокна), либо ингибируя (УВ, металлы) процесс выделения дисперсных частиц [3]. Как правило, фазовое разделение не завершается по окончании технологического процесса отверждения связующего в УП, что обуславливает термодинамическую и агрегативную неустойчивость матрицы, вследствие которой ее микроструктура и свойства пластика изменяются во времени, особенно при воздействии повышенных температур, термовлаж-

ностных испытаниях и деформировании (ползучесть). В связи с изложенным другой задачей настоящей работы стало изучение микроструктуры матриц в УП.

Методика эксперимента

Объектами исследований служили многокомпонентные эпоксидные связующие ЭДТ-10, ВСТ-1210, RTM-6, перерабатываемые RTM (Resin Transfer Molding)-технологией, М-21 (прессовым методом) и УП на их основе, армированные высокопрочными УВ марок AS-4 (ткань сатинового переплетения) и Т-700. Кинетику отверждения связующих исследовали на динамическом механическом анализаторе (ДМА) и дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) фирмы TA Instruments (США), определяя время гелеобразования, температуру минимальной вязкости, температуру и теплоту отверждения связующего и температуру стеклования матрицы в углепластике. Образцы УП сечением 6×6 мм и длиной 40 мм испытывали на межслойный сдвиг методом «короткой балки», на рабочей базе 30 мм, при скорости перемещения активного захвата 0,5 мм/мин. Фрактографию расслоившихся при сдвиге образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-35CF (JEOL) в режиме вторичных электронов, используя специальную методику препарирования [4]. Количественная обработка полученных структур проводилась

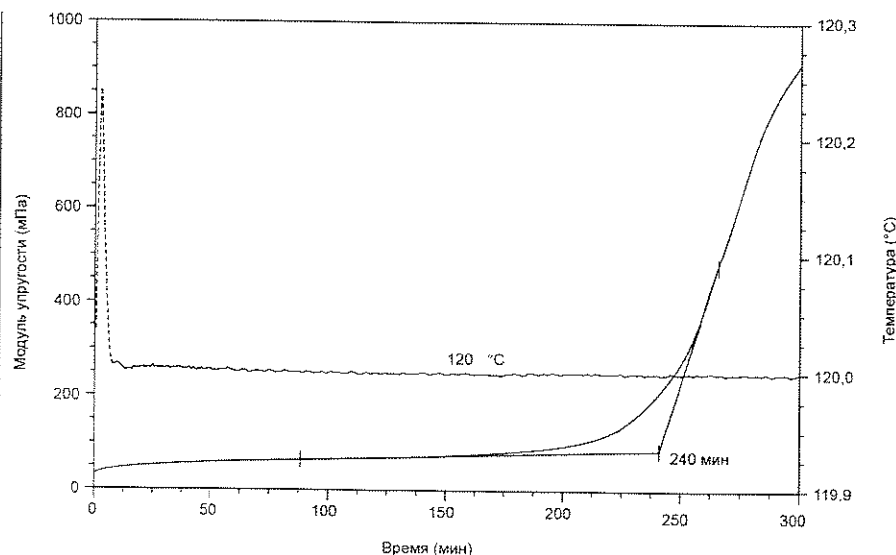


Рис. 1. Определение времени гелеобразования методом ДМА на примере связующего RTM-6

с применением программного обеспечения анализа изображений Image Scope Color (разработчик ООО «Системы для микроскопии и анализа»).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Ниже приведены результаты исследований процесса гелеобразования выбранных связующих. Для определения времени гелеобразования образец нагревали до требуемой температуры, непрерывно фиксируя изменения динамического модуля упругости, как это показано на рис. 1 для связующего RTM-6. Расчетное значение времени (τ) измеряли на временной шкале по точке перегиба кривой динамического модуля упругости. На рис. 2 приведены зависимости τ от температуры выдержки образца. Математическая обработка кривых этого рисунка показала, что они удовлетворительно подчиняются экспоненциальному уравнению:

$$\tau = \tau_0 \exp(-bt), \quad (1)$$

где τ_0 — время гелеобразования, мин, определяемое при $t \rightarrow 0$ °С; b — коэффициент с размерностью мин/град·К. В таблице сведены значения указанных коэффициентов и энергии активации процесса ($E_{\text{акт}}$), рассчитанной по наклону зависимостей (см. рис. 2). Сопоставление значений τ_0 и $E_{\text{акт}}$ выявило их взаимосвязь

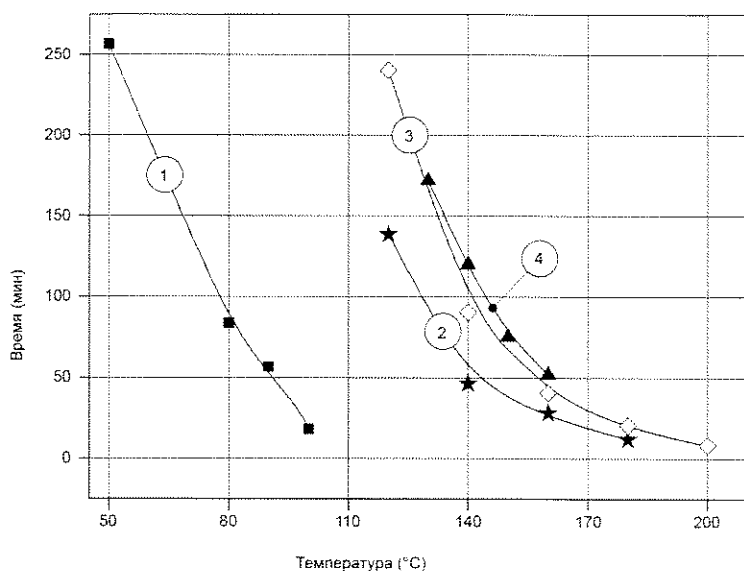


Рис. 2. Зависимость времени гелеобразования эпоксидных связующих от температуры изотермической выдержки:

1 — ЭДТ-10; 2 — ВСТ-1210; 3 — RTM-6; 4 — М-21

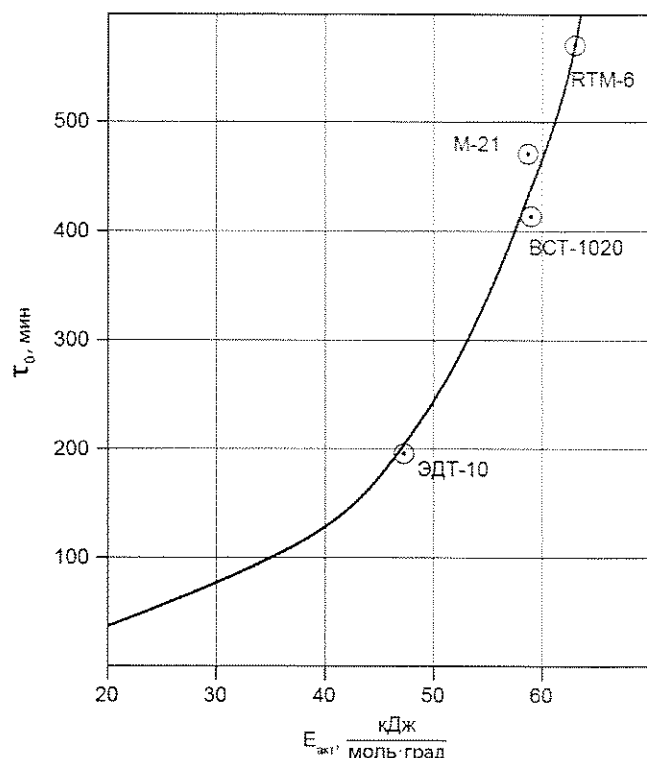


Рис. 3. Зависимость параметра τ_0 от энергии активации процесса гелеобразования эпоксидных связующих (пояснения в тексте)

(рис. 3), которую также можно описать экспоненциальным уравнением:

$$\tau_0 = [\tau_0]_{\text{нач}} \exp(kE_{\text{акт}}), \quad (2)$$

где $[\tau_0]_{\text{нач}}$, равное 13,5 мин, — начальное время гелеобразования, определяемое при $E_{\text{акт}} \rightarrow 0$; k — коэффициент с размерностью мин·моль·град·К/кДж.

Как видно из рис. 3 и уравнения (2), время гелеобразования монотонно возрастает по мере увеличения энергии активации процесса. Малые величины τ_0 , обусловленные невысокими значениями $E_{\text{акт}}$, например, для связующего ЭДТ-10, предполагают существенный риск некачественной пропитки заготовки при RTM-технологии в результате преждевременного гелеобразования связующего. Зависимость (см. рис. 3) наглядно иллюстрирует целесообразность выбора связующего с ориентацией на величину энергии активации процесса гелеобразования, которая, исходя из представленных данных, не должна быть ниже 55–58 кДж/моль·град·К. Поскольку коэффициенты b и k для данной серии связующих практически постоянны, использование уравнений (1) и (2) упроща-

Параметры уравнения (1) и значения энергии активации процесса гелеобразования, рассчитанные для различных эпоксидных связующих

Марка связующего	τ_0 , мин	b , мин/град·К	Уравнение	$E_{акт}$, кДж/моль × град·К
ЭДТ-10	194	0,021	$y = 5678,7x - 7,8061$	47,2
ВСТ-1210	412	0,017	$y = 7032x - 8,941$	58,5
RTM-6	572	0,018	$y = 7559,5x - 9,677$	62,8
М-21	470	0,017	$y = 7027,3x - 8,180$	58,4

ет экспресс-выбор типа связующего с требуемыми значениями времени гелеобразования и энергии активации процесса.

Для качественной пропитки волокнистой заготовки методом RTM большое значение имеет текучесть связующего, определяющая скорость процесса. Совершенно очевидно, что инъекцию связующего в заготовку целесообразно проводить при такой температуре, когда его вязкость минимальна. На рис. 4 показаны температурные зависимости динамической вязкости эпоксидных связующих, используемых при RTM-технологии. Немонотонный характер кривых, типичный для исследованных связующих, отражает их многокомпонентный состав. Наличие площадок и перегибов на этих кривых для связующих ВСТ-1210 и RTM-6 при температу-

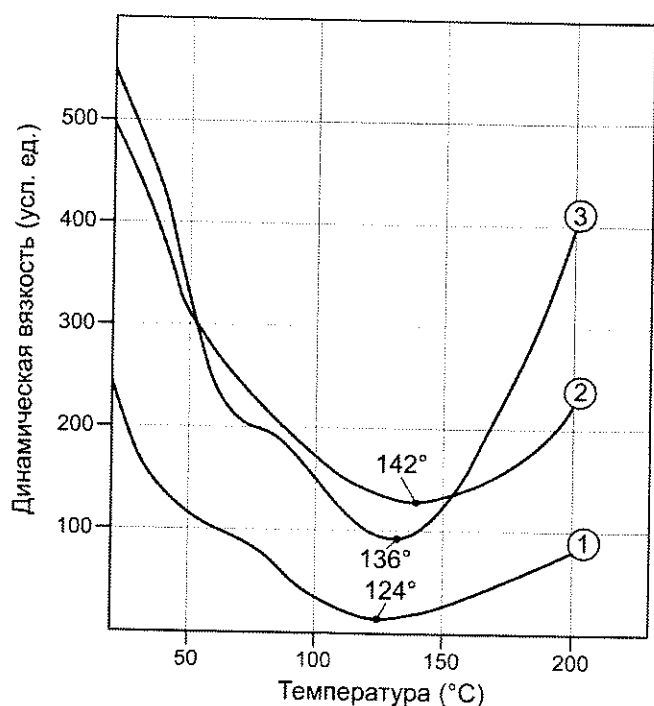


Рис. 4. Зависимость динамической вязкости от температуры для эпоксидных связующих: 1 — ВСТ-1210; 2 — ЭДТ-10; 3 — RTM-6

рах 70—90 °С определяется наиболее вязкой компонентой. Снижение ее вязкости при нагреве и обуславливает достижение температуры минимальной вязкости системы, которая составляет 124 °С для ВСТ-1210 и 136 °С для RTM-6. Повышенная температура минимальной вязкости у ЭДТ-10 (142 °С) с учетом сравнительно низкой энергии активации процесса гелеобразования создает опасность преждевременного отверждения этого связующего в заготовке крупногабаритного изделия до окончания пропитки.

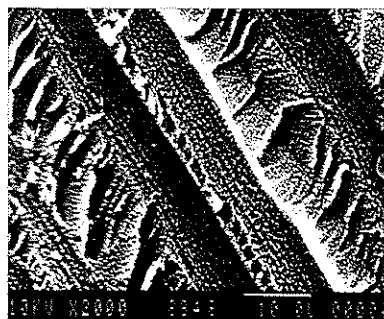
Температура и тепловой эффект реакции отверждения являются важными технологическими параметрами при производстве изделий из композиционных материалов. Поскольку процесс отверждения эпоксидных связующих является экзотермическим, возможен неконтролируемый саморазогрев матрицы и неоптимальное ее отверждение, вследствие чего возникает опасность возникновения повышенной концентрации внутренних напряжений, снижения температуры стеклования и механических характеристик материала. Температуру отверждения связующих определяли из анализа ДСК-термограмм, тепловые эффекты — по площади экзотермических пиков. Исследования показали, что связующее ЭДТ-10 отверждается в диапазоне температур 100—140 °С с тепловым эффектом 16 Дж/г и максимумом при 129 °С, ВСТ-1210 — при 160—180 °С с тепловым эффектом 17 Дж/г и максимумом при 170 °С, RTM-6 — в диапазоне 188—248 °С с тепловым эффектом 350 Дж/г и максимумом при 200 °С. Таким образом, наибольшая вероятность нежелательного влияния экзотермы процесса отверждения на свойства материала существует в случае использования связующего RTM-6. Для ее нивелирования следует предусмотреть шалющие параметры технологического процесса: низкую скорость подъема температуры или изотермическую выдержку в температурном диапазоне отверждения, более длительные выдержки и (или) принудительное охлаждение прессформы на начальной стадии экзоэффекта.

Температуру стеклования, определяющую температурный диапазон эксплуатации композиционного материала, измеряли по точке перегиба зависимости динамического моду-

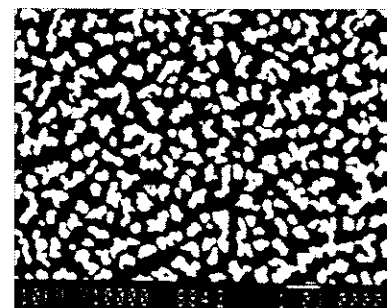
ля упругости от температуры испытания образца. Для связующего ЭДТ-10 она составила 90 °С, для ВСТ-1210 — 177 °С, для RTM-6 — 200 °С, при этом модуль упругости при температуре стеклования у связующих ВСТ-1210 и RTM-6 оставался на уровне 90—92% от измеренного при 20 °С. Следует отметить, что дополнительная термообработка в свободном состоянии образцов связующего ВСТ-1210 и УП на его основе при 230 °С повышала их температуру стеклования до 200 °С.

На основании анализа экспериментальных данных, полученных при изучении кинетики отверждения эпоксидных связующих, для RTM-технологии наиболее пригодно связующее ВСТ-1210. Оно имеет наименьшую динамическую вязкость при 124 °С (в три раза меньшую, чем минимальная вязкость связующего RTM-6 и в четыре раза — чем у ЭДТ-10), практически не изменяющуюся в диапазоне 100—150 °С, незначительную величину экзoeffекта и высокую температуру стеклования при условии применения дополнительной термообработки материала.

На рис. 5—8 приведены сканирующие электронные микрофотографии структуры УП, изготовленные на основе выбранных связующих и разрушившихся при межслойном сдвиге. Матрица ЭДТ-10 имеет типичное гетерофазное («микроматричное») строение (см. рис. 5) [3—5]. Ее микроструктура образована двумя фазами, одна из которых (светлые участки) представляет собой дисперсные частицы (ДЧ), занимающие около 53% (об.) полимера (см. рис. 5, б) и достаточно равномерно распределенные в изотропной дисперсионной среде (темное поле). ДЧ, образовавшиеся в результате коагуляции наноразмерных коллоидных частиц, имеют неправильную форму, а их размеры колеблются в диапазоне 200—800 нм. Невысокая когезионная прочность это-

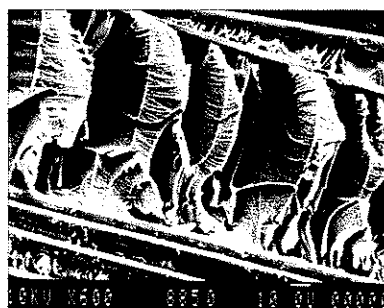


а

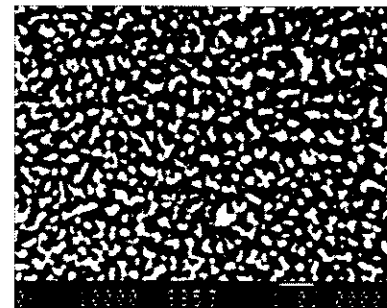


б

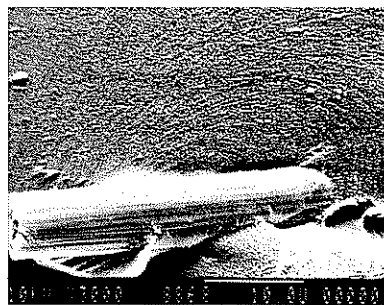
Рис. 5. Микроструктура поверхности разрушения пластика на основе связующего ЭДТ-10 и углеродных волокон AS-4:
а — $\times 2000$; б — $\times 10000$



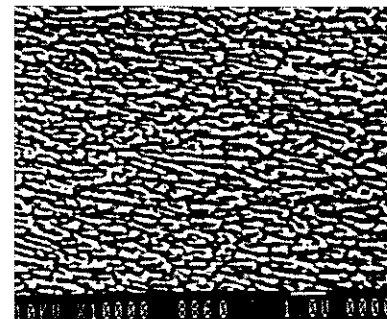
а



б



в



г

Рис. 6. Микроструктура поверхности разрушения пластика без термообработки (а, б) и после термообработки (в, г) на основе связующего ВСТ-1210 и углеродных волокон AS-4:
а — $\times 600$; б, г — $\times 10000$; в — $\times 3000$

го связующего в углепластике, изготовленном на основе волокна AS-4, обуславливает низкий уровень сопротивления материала межслойному сдвигу (45 МПа). Микромеханический анализ расслоившихся поверхностей этой матрицы (см. рис. 5, а) показал, что ее разрушение происходит по торсионному механизму [6] с образованием торсионов, оси которых располагаются перпендикулярно действию сдвиговой нагрузки. Их средний диаметр колеблется в пределах 3—7 мкм, а неправильная форма обусловлена наложением внутренних напряжений, действующих в зоне магистральной трещины.

Такой же механизм разрушения реализуется при сдвиговом расслоении УП на основе углеродной ткани и связующего ВСТ-1210 (рис. 6, а). Диаметры торсионов, имеющих такую же неправильную форму, значительно больше (20—38 мкм), чем в случае углепластика на связующем ЭДТ-10. В этой матрице ДЧ размерами 200—400 нм достаточно равномерно распределены в дисперсионной среде, их концентрация не превышает 41% (об.) (см. рис. 6, б). Содержание ДЧ в матрице заметно увеличивается (до 49% (об.)) после термообработки УП при 230 °С в течение двух часов (см. рис. 6, в, г). Это свидетельствует о продолжении фазового расслоения в матрице ВСТ-1210, которая после отверждения УП по стандартному режиму находится в неравновесном состоянии. Важно отметить, что даже после термообработки «микроматрица» находится в вязко-пластическом состоянии. При ее нагружении наблюдается деформирование ДЧ, приобретающих вытянутую форму и ориентирующихся в направлении действия главных напряжений (см. рис. 6, в, г). Следовательно, первичные (коллоидные) частицы в объеме ДЧ связаны слабыми межмолекулярными связями, обеспечивающими высокую подвижность их формы. Податливость формы ДЧ можно использовать для анализа распределения микродеформаций в композиционном материале и построения картины объемно-деформированного состояния матрицы на заключительной стадии разрушения образца [4]. Для УП на основе ВСТ-1210 не замечено расслоения по границе раздела «волокно — матрица», что свидетельствует о высокой адгезии этого связующего к поверхности наполнителя. Как и в случае ЭДТ-10, прочность при межслойном сдвиге УП (60—65 МПа) определяется когезионной прочностью матрицы. После термообработки прочность при сдвиге этого УП понижается до 45 МПа, несмотря на то, что матрица не теряет вязко-пластических свойств. В связи с этим, для расширения области применения связующего ВСТ-1210 целесообразно провести модифицирование, направленное на повышение его когезионной прочности.

Фрактография образцов УП на связующем RTM-6 после испытаний на межслойный сдвиг приведена на рис. 7, микроструктура которых принципиально не отличается от представлен-

ных выше. На поверхности расслоения видны торсионы, поперечные размеры которых варьируют в пределах 3—6 мкм, при этом их торцы, «приклеенные» к поверхности волокон AS-4, дробятся на «микроторсионы» с поперечным размером 0,3—0,8 мкм (см. рис. 7, а). ДЧ вытянутой формы также фиксируют направление главных напряжений, как и в других образцах (см. рис. 7, б). Обращает на себя внимание значительная толщина (до 2—4 мкм) граничных слоев матрицы, образованных ДЧ, ориентированными нормально к поверхности волокон (см. рис. 7, в). Частицы дисперсной фазы, расположенные в участках, удаленных от влияния поверхности УВ, отличаются более крупными (0,4—0,7 мкм) размерами (см. рис. 7, г), а их концентрация доходит до 58% (об.). Большой размер ДЧ косвенно указывает на тот факт, что фазовое разделение в связующем RTM-6 приближается к равновесному состоянию, но не достигает его. Как и в УП на основе ВСТ-1210, в этом образце не замечено расслоений на межфазной границе раздела вследствие удовлетворительной прочности сцепления компонентов материала, а невысокая прочность его при сдвиге (50 МПа) является следствием пониженной когезионной прочности данной матрицы.

Наиболее сложная микроструктура матрицы обнаружена при исследовании УП на основе связующего М-21 и УВ Т-700. На отдельных участках поверхности разрушения можно обнаружить торсионы, но такой характер расслоения не является типичным (рис. 8, а, б). Наряду с обычной для полиэпоксидов «микрокомпозиционной» структурой с достаточно равномерным распределением ДЧ часто встречаются участки, образованные разветвленными частицами дисперсной фазы самой разнообразной формы. При рассмотрении матрицы, удаленной от поверхности волокон, эти участки формируют в объеме обычной для полиэпоксидов структуры изолированные надструктуры большего порядка с весьма четко выраженной границей раздела и поперечными размерами 10—20 мкм и более (см. рис. 8, в, г). Образование такой необычной микроструктуры, по нашему мнению, возможно в случае введения в систему термопластичной или эластомерной компоненты с высокой молекулярной массой, ограниченно растворимой в эпоксидном связующем. Раствор эпокси-

сидной смолы в этой компоненте, по-видимому, выделяется в виде обнаруженных надструктур. УП на ее основе имеет повышенную прочность при межслойном сдвиге (65–75 МПа) и высокую ударную прочность. Для УП также характерны расслоения по границе раздела «волокно — матрица» (см. рис. 8, *а*) и микропоры в матрице диаметром до 4 мкм (см. рис. 8). Исследованная матрица отличается высокой когезионной прочностью и значительным удлинением при разрыве, а поверхность волокна Т-700 не обеспечивает необходимого сцепления на всей межфазной границе раздела.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что оптимальное время гелеобразования эпоксидного связующего целесообразно оценивать методом ДМА по величине энергии активации процесса, которая в нашем случае должна быть не менее 55–58 кДж/моль·град·К. Использование этого метода позволило установить температурную зависимость вязкости связующего, определить температуру минимальных значений этого параметра, весьма важного для проектирования RTM-технологического процесса. Методами ДМА и ДСК оценены величины температуры стеклования и экзоэффекта для выбранных систем. По сумме перечисленных показателей наиболее подготовленным для RTM-технологии является эпоксидное связующее ВСТ-1210.

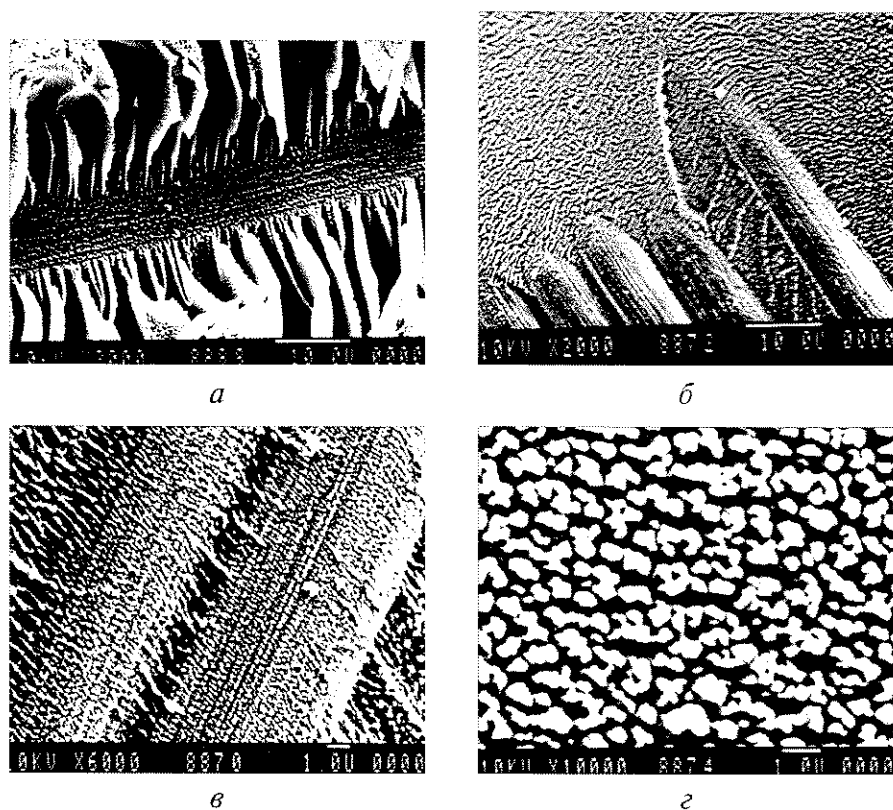


Рис. 7. Микроструктура поверхности разрушения пластика на основе связующего RTM-6 и углеродных волокон AS-4:

а, б — $\times 2000$; *в* — $\times 6000$; *г* — $\times 10000$

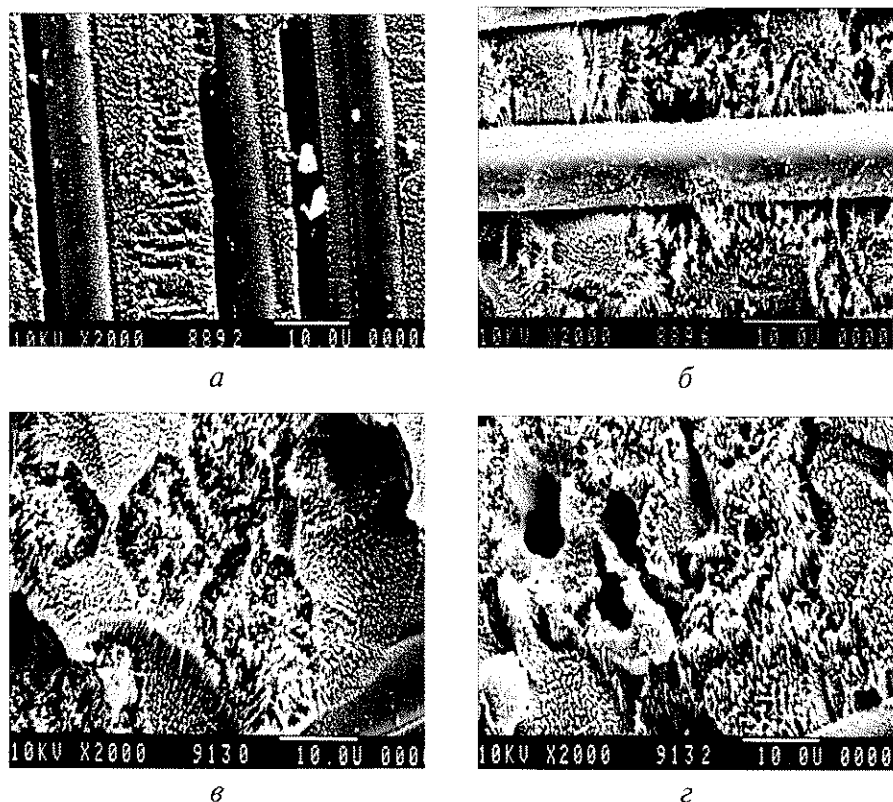


Рис. 8. Микроструктура поверхности разрушения пластика на основе связующего М-21 и углеродных волокон Т-700 ($\times 2000$)

Изучение поверхностей разрушения углепластиков при межслойном сдвиге методом сканирующей электронной микроскопии показало, что отвержденные эпоксидные матрицы на основе выбранных связующих можно отнести к коллоидно-дисперсным системам, микроструктура которых образована частицами дисперсной фазы, распределенными в изотропной дисперсионной среде («микроматрице»). Поперечные размеры частиц варьируют в пределах 0,2—0,8 мкм, их объемная концентрация колеблется от 41 до 58%. Увеличение содержания дисперсной фазы в матрице ВСТ-1210 после дополнительной термообработки углепластика свидетельствует о продолжении фазового расслоения в этой матрице, которая находится в неравновесном состоянии после отверждения по стандартному режиму. По-видимому, такое же состояние характерно для других матриц в углепластиках, влияние термообработки которых в данной работе не исследовалось. Подтверждением правомерности этого заключения служит тот факт, что максимум выделения экзотермического тепла при отверждении RTM-6 наблюдается при 200 °С, а завершение этого процесса происходит при 248 °С, в то время как максимальная рекомендуемая температура отверждения материала составляет 200 °С. Незавершенность фазового расслоения в полимерной матрице обуславливает нестабильность термомеханических характеристик материала и конструкций на его основе в процессе хранения и эксплуатации, проявление неконтролируемой ползучести и других не-

желательных явлений. В связи с изложенным оценка степени стабильности «микрокомполитной» структуры терморезактивной матрицы должна стать обязательной при отработке технологии изготовления углепластиков и производстве конкретных деталей на их основе.

Усложненную «микрокомполитную» структуру матрицы М-21 можно отнести к супрамолекулярной [7], в которой рецептором служит термопластичная (или эластомерная) составляющая, а субстратом — раствор эпоксидной части связующего в термопластичной (эластомерной) компоненте. Такая необычная микроструктура является желательной для торможения процесса развития микротрещин в матрице и повышения сопротивления ударному нагружению композиционного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригородов В.Н., Кобец Л.П., Чубарова М.А. и др. // Композиционные материалы. 1983. Вып. 19. С. 14—23.
2. Мельниченко В.П., Безрук Л.И., Липатов Ю.С. // Синтез и физико-химия полимеров. 1971. № 9. С. 119—131.
3. Деев И.С., Кобец Л.П. Структурообразование в наполненных терморезактивных полимерах // Коллоидный журнал. 1999. Т. 61. № 5. С. 650—660.
4. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и микрополей деформаций в полимерных композитах методом растровой электронной микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. Т. 65. № 4. С. 27—34.
5. Деев И.С., Лямина И.Н., Кобец Л.П. // Труды Второй международной научно-технической конференции «Полимеры, полимерные композиционные материалы». Барнаул. 2001. С. 82—94.
6. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композиционных материалов на их основе // Материаловедение. 2010. № 5. С. 8—16. № 6. С. 13—18.
7. Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия. Новосибирск: Наука, 1998. 334 с.

ООО "Наука и технологии"

Учредитель журнала ООО "Наука и технологии"

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 014669 от 29.05.1999 г.

Сдано в набор 26.04.2011. Подписано в печать 01.06.2011. Формат 60 × 88 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 6,83. Уч. изд. л. 7,67. Тираж 110 экз.

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в ООО "Сид".
Отпечатано в ООО "Сид"