

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ ЭКОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

П.Н. Логвинович, ст. преподаватель (УО БГАТУ)

### Аннотация

*Представлены результаты исследований свойств и кинетики отверждения полимерных композитных материалов. Методика и аппаратура исследований основаны на использовании нестационарного эффекта смещения частоты непрерывных колебаний, распространяющихся в исследуемом материале. Выявлены особенности изменения акустических и электрофизических свойств композитных материалов в процессе их отверждения.*

### Введение

Одной из характерных черт научно-технического прогресса на современном этапе является все более широкое внедрение новых композитных материалов (КМ), являющихся синтезом двух, трех и более материалов различного происхождения (пластмасса, резина и каучук, неорганические вещества и т.д.). Благодаря своим уникальным свойствам КМ постепенно вытесняют традиционные материалы во всех ведущих отраслях промышленности и хозяйства. Согласно устойчивым представлениям, конструкционные материалы из композитов считаются базовыми для создания энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий [1]. Применение композитных материалов обеспечивает новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, энергетических и транспортных установок, уменьшении массы машин и приборов. Сочетание высоких прочностных свойств и минимального удельного веса обуславливает широкое применение композитных материалов в сельскохозяйственном машиностроении. Из них изготавливаются зубчатые колеса; узлы силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву; элементы кузовов, рессор, рам, панелей, бамперов, детали комбайнов; различные емкостные аппараты и трубопроводы, работающие в агрессивных средах, и т.д.

За последние годы достигнуты впечатляющие успехи в программировании свойств таких материалов. Вместе с тем в практике производства и переработки композитов существенная роль пока принадлежит интуитивному подходу, а количественные оценки в ряде случаев весьма ограничены. Это обусловлено, во-первых, отсутствием завершенных стройных физических теорий сложных гетерофазных систем, какими являются композиты; во-вторых, ограниченностью информации о стандартных свойствах наполнителей и связующих, а также готовых материалов, предназначенных для различных отраслей техники. Что касается ме-

тодов и средств исследования и контроля свойств КМ, то в этой области ощущается заметное отставание, так как многие традиционные методы оказываются для таких материалов малоприменимыми. Экспериментальное определение свойств композитных материалов с различными схемами армирования требует весьма большого объема дорогостоящих исследований. Задача усложняется еще тем, что технологически процесс производства такого материала и процесс изготовления из него изделия не разделены во времени, как, например, для металлов, а совмещены. Это значит, что эффективным в данном случае может быть только автоматизированный контроль свойств КМ в процессе производства изделий, а не контроль готовой продукции. Задача разработки специальных методов и автоматизированных средств для КМ является чрезвычайно актуальной.

Вопрос о синтезе полимеров с заранее заданными свойствами является основной проблемой полимерной науки [2]. Проектирование композитов – необходимый начальный этап при создании новых конструкций из них, т.к. только в этом случае может быть максимально эффективно реализовано соответствующее инженерное решение. На данном этапе важно теоретически и экспериментально описать кинетику процесса полимеризации, ход которой в конечном итоге определяет формирование физико-механических свойств материала и изделия в целом.

Как всякую химическую реакцию, процесс формирования сетчатого полимера следует описывать, основываясь на законе действующих масс [3], т.е. обычными приемами химической кинетики. Однако уже простые кинетические задачи для реакций низкомолекулярных соединений, связанные с определением концентрации реагирующих веществ, оказываются очень часто весьма сложными. Для получения решений в аналитическом виде необходимо вводить различные допустимые предположения, например, о квазистационарности процесса. В случае полимеризационных процессов трудности возрастают, и осо-

бенно резко, когда речь идет о сетчатых полимерах, характеризующихся сложной топологической структурой. Поэтому задача описания процесса образования сетчатого полимера кинетическим методом представляется весьма сложной. Именно поэтому наряду с кинетическим подходом появились и статистические, позволяющие установить закономерности процесса более простым способом [4]. Неудовлетворенность результатами, к которым приводит использование статистических приемов, и невозможность использовать прямые кинетические подходы привели к развитию модельных методов, основанных на применении вычислительной техники [5, 6].

Наконец, для выяснения кинетических закономерностей и механизма процесса формирования полимера используются и разрабатываются различные экспериментальные методы [7]. Прежде всего, это методы химического анализа, обладающие рядом существенных недостатков. Они требуют тщательной предварительной работы по выбору метода дробления анализируемой пробы, установлению необходимой дисперсности частиц, анализу и учету возможных механико-химических процессов в ходе диспергирования, подбору растворителя, в котором хорошо набухает анализируемый полимер и хорошо смешивается с раствором титранта, а также установлению необходимого для полноты реакции времени анализа.

Наибольшее распространение для исследования кинетики получили методы непрерывного контроля, малочувствительные к изменению агрегатного состояния реагирующей системы. Это различные варианты калориметрии (изотермическая, адиабатическая, дифференциальная сканирующая), ИК-спектроскопии (спектры пропускания и метод измерения нарушенного полного внутреннего отражения) и др. [3, 8].

Важными характеристиками композитов на основе полимеров являются такие, как точка гелеобразования и температура стеклования. Определение точки гелеобразования (или, по-другому, критической глубины превращения в системе) – один из наиболее распространенных способов характеристики топологической организации сетчатого полимера. Большинство методов контроля этой величины основано на измерении вязкости реакционной системы или на простом визуальном наблюдении момента потери текучести системой [9]. Точность этих методов обычно невысока.

Температура стеклования полимеров определяет температурную область их использования. Наиболее распространенным методом определения температуры стеклования является термомеханический [9], когда на образец действует небольшая постоянная сила, а температура непрерывно возрастает во времени по линейному закону и при этом фиксируется деформация образца. Из других методов определения температуры стеклования следует отметить dilatометри-

ческий [9] (измеряется зависимость удельного объема полимера от температуры), калориметрический [8] (измеряется зависимость теплоемкости при постоянном давлении от температуры) и электрофизический [10] (измеряется зависимость диэлектрических характеристик полимера от температуры). Все перечисленные методы определения температуры стеклования являются косвенными, и результат значительно зависит от скорости изменения температуры.

### Методика и аппаратура

Обычно при исследовании структурных изменений в пластмассах и слабопроводящих ток КМ классическим считается электрофизический метод, основанный на измерении электропроводности [10]; применяются также обычные ультразвуковые методы [11]. Недостатком этих методов является то, что они обладают большой относительной погрешностью при измерении малых приращений измеряемых величин и поэтому не дают возможности получать достоверную информацию о кинетических характеристиках процесса отверждения КМ.

Проведенные в данной работе исследования также основываются на взаимосвязи электрофизических и акустических характеристик со структурными изменениями КМ в процессе отверждения. Однако методика измерений состоит в том, что в режиме реального времени отслеживаются скорость и величина изменения контролируемого физического параметра, что дает возможность направленно регулировать процессы взаимодействия между компонентами композиций на стадии их формирования, а также оптимизировать технологические условия изготовления изделий из них, получать материалы с заранее заданными и качественно улучшенными свойствами. Методика основана на существовании эффекта параметрического сдвига частоты гармонических колебаний, возникающего при их распространении в среде с изменяющимися во времени параметрами [12]. Автоматизированная измерительная система, созданная для реализации этой методики, позволяет непрерывно выделять, измерять и интегрировать по времени изменение частоты измерительного квазигармонического сигнала, обусловленное изменением во времени контролируемого параметра [13]. Изменение частоты при этом определяется скоростью изменения параметра, а результат интегрирования – величиной этого изменения. Поскольку первичная информация об измеряемом физическом параметре содержится именно в частоте сигнала, используемый метод измерения принципиально обладает более высокой разрешающей способностью, более высокой точностью измерений, чем амплитудные, временные (фазовые) или резонансные частотные методы, независимо от уровня развития измерительной техники в целом.

## Экспериментальные исследования

### Контроль процесса отверждения армированной полимербетонной композиции

Исследованию подвергались КМ, армированные с целью придания им повышенных механических и электропроводящих свойств модифицированным углеродным волокном (УВ). В качестве полимерной основы использовалась эпоксидная смола ЭД-20 или эпоксидно-этилсиликатное связующее, заполнителем служили пылевидный кварц КН-3, портландцемент или их смесь. Для улучшения технологических свойств в композицию добавляли реакционноспособный разбавитель ДЭГ-1. Армирующим наполнителем служили отрезки (длиной 1 мм) модифицированных УВ, полученных путем карбонизации гидратцеллюлозных волокон, предварительно пропитанных в водных растворах солей железа, алюминия или смеси хлоридов металлов (титана, алюминия, железа, магния), представляющих собой отходы титаномагниевого производства.

Для сравнительной оценки нестационарного частотно-фазового метода процесс отверждения КМ исследовался на автоматизированной измерительной системе, которая непрерывно измеряла и регистрировала изменение во времени скорости ультразвука в КМ. Одновременно измерялась удельная объемная электропроводность [12].

Кинетические кривые отверждения для электропроводности представлены на рис. 1, для скорости ультразвука – на рис. 2.

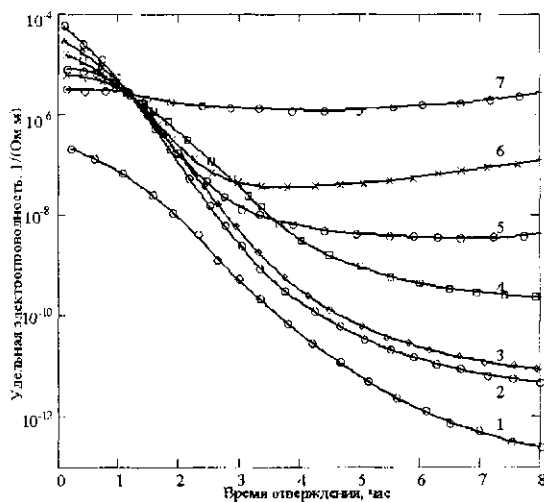


Рис. 1. Зависимость удельной объемной электропроводности от времени отверждения эпоксидного связующего без наполнителей (1) и полимербетонной композиции с различным содержанием металлосодержащего углеволокна (4 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 5 – 30; 6 – 40; 7 – 50 вес. частей)

Из рис. 1 видно, что изменение электропроводности композиции в процессе отверждения при больших концентрациях УВ носит неоднозначный характер, кроме того, характер ее временной зависимости и вели-

чина для полностью отвержденного состава зависят от количества введенного в систему модифицированного УВ. При небольших концентрациях УВ (кривые 2, 3), когда волокна отделены друг от друга значительной прослойкой связующего, наполненная композиция обладает повышенными по сравнению с ненаполненной (кривая 4) диэлектрическими свойствами, несмотря на то, что электропроводность УВ гораздо больше, чем смолы. Это указывает на активную роль УВ в процессе структурирования композиции. Ход кривых зависимости объемной проводимости от времени при небольших наполнениях УВ аналогичен кривой отверждения композиции без волокна и электрические свойства композиции, в основном, определяются связующим. На кривых имеется крутой участок, соответствующий резкому падению электропроводности, когда не наблюдается образование сетчатого полимера (по данным химического анализа), и более плавный, характеризующий формирование пространственной структуры. При дальнейшем увеличении степени наполнения модифицированными УВ (кривые 5, 6) наблюдается постепенный рост электропроводности, что, вероятно, связано с одной стороны, с ростом внутренних напряжений при отверждении, с другой – с увеличением при уплотнении системы эффекта дальнего действия поверхности модифицированного УВ. При больших концентрациях волокна, когда практически весь объем связующего находится в сфере влияния УВ, электрические свойства композиции в процессе отверждения изменяются незначительно (кривая 7) и определяются свойствами волокна и межволоконных прослоек.

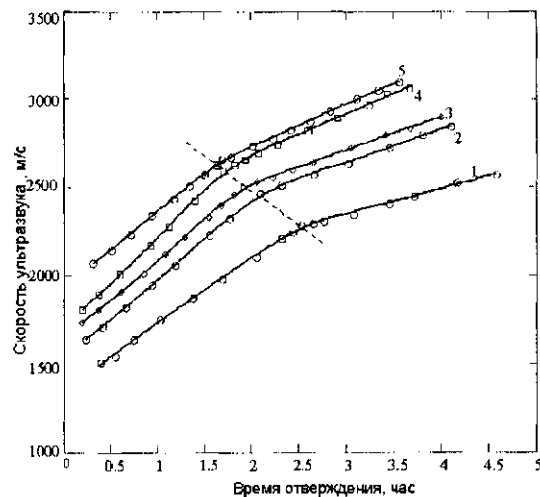


Рис. 2. Зависимость скорости ультразвука от времени отверждения эпоксидного связующего без наполнителей (1) и полимербетонной композиции с различным содержанием металлосодержащего углеволокна (4 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 50 вес. частей)

Как видно из рис. 2, введение волокнистого углеродного наполнителя приводит к увеличению скорости ультразвука как в свежеприготовленном составе, так и на протяжении всего процесса отвер-

ждения. Это также указывает на активную роль УВ в композиции и является следствием изменения внутри- и межмолекулярных взаимодействий при введении модифицированных волокон, т.к. известно, что скорость ультразвука, зависящая от модуля упругости системы, есть функция этого взаимодействия и степени внутримолекулярной подвижности.

Характер зависимости скорости ультразвука от времени отверждения композиции одинаков как для ненаполненного КМ, так и для КМ с различной степенью наполнения УВ. При этом наблюдается два участка, на которых эта зависимость линейна. Наклон кривой на первом участке (в начале отверждения) больше, чем на втором. Область изменения наклона кривой, как показали исследования, соответствует тому моменту времени, когда связующее теряет текучесть и полимерная матрица образует трехмерную структуру, способную воспринимать нагрузку. С этого момента (различного для КМ с разной степенью наполнения УВ) связующее и наполнитель представляют собой монолитный материал, упругость которого увеличивается по мере отверждения полимерной матрицы.

Таким образом, при больших концентрациях УВ метод электропроводности становится малоинформативным и практически непригодным для контроля процесса отверждения таких КМ; информативность же разработанного ультразвукового метода не снижается при увеличении степени наполнения УВ.

В другой серии экспериментов исследовалась температурная зависимость скорости продольных ультразвуковых волн и электропроводности КМ, наполненного УВ [14]. На рис. 3,а показана зависимость логарифма электропроводности от обратного значения абсолютной температуры для двух образцов при напряженности электрического поля, равной 5000 В/м. Из рисунка видно, что в области температур 54–61°C изменяется наклон кривых. Вне этой области зависимость прямолинейна (исключая область более высоких температур). Для прямолинейных участков справедлива зависимость электропроводности  $\sigma$  от температуры  $T$  вида

$$\sigma \sim \exp\left(-\frac{E}{kT}\right),$$

где  $E$  — энергия активации проводимости [14].

Различие энергий активации проводимости в разных температурных диапазонах согласуется с литературными данными [15].

Обычно считают [16], что температура, при которой происходит изгиб зависимости  $\ln\sigma=f(1/T)$ , соответствует температуре стеклования  $T_c$  (температура, при которой молекулы полимера приобретают подвижность, начинается движение сегментов молекулярных цепочек) композиции. В нашем случае для наполненной и ненаполненной композиции эта температура соответственно равна 61 и 54°C.

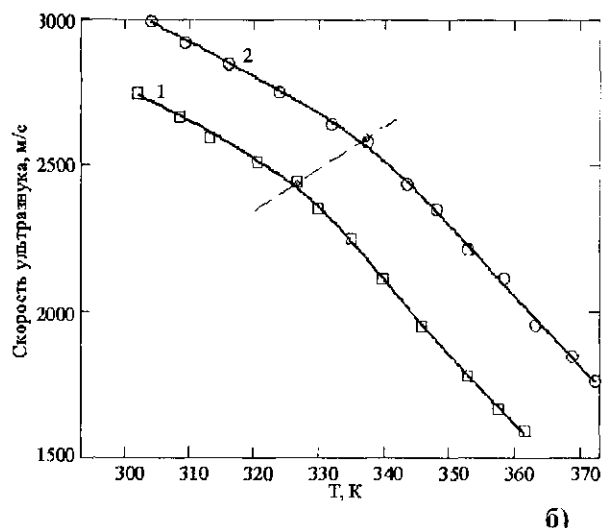
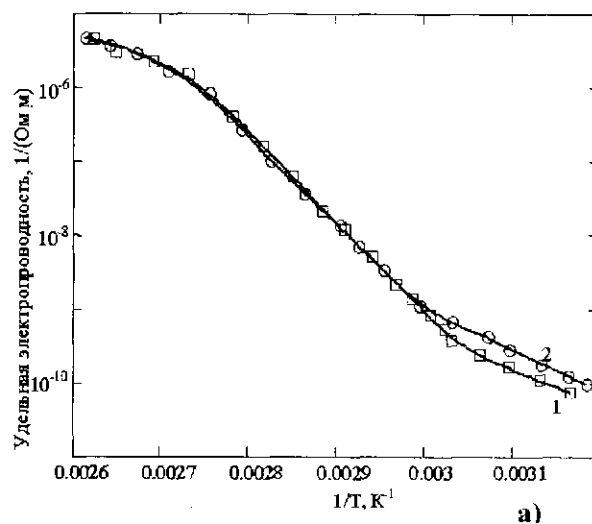


Рис. 3. Зависимости электропроводности от обратной температуры (а) и скорости ультразвука от температуры (б) для эпоксидной композиции без наполнителей (1) и наполненной пылевидным кварцем и металлсодержащим УВ (2).

Сравним теперь приведенные выше результаты по электропроводности и температурной зависимости скорости ультразвука для этих же материалов (рис. 3,б). Температурная зависимость скорости ультразвука снималась с помощью автоматизированной измерительной системы, работающей в режиме непрерывного слежения и позволяющей измерять приращение скорости ультразвука в исследуемых образцах с погрешностью не более 0,05 м/с. Как видно из рисунка, наблюдаются два участка, на которых зависимость скорости ультразвука от температуры линейна. Такая зависимость для композитных материалов подтверждается и другими исследованиями. Оказывается, что характер температурной зависимости для всех полимеров плохо согласуется с теоретической моделью,

согласно которой эта зависимость должна быть нелинейной во всем температурном диапазоне. В действительности, скорость ультразвука всегда зависит линейно от температуры и лишь при изменении характера молекулярной подвижности температурный коэффициент ее изменяется практически скачком. Наклон прямых при более низких температурах меньше, чем при более высоких. Излому прямых наполненного и ненаполненного образцов соответствуют температуры 65 и 52°C, что очень близко к температурам, соответствующим излому прямых на рис. 3,а. Как показали термомеханические исследования, это и есть область температуры стеклования исследуемых композиций. Температура стеклования является одной из характеристик степени отверждения композитного материала, которая, в свою очередь, непосредственно связана с физико-механическими и другими свойствами.

Обращает на себя внимание параллельность прямых для обоих образцов, несмотря на различие их состава, хотя абсолютная величина скорости в образцах различна. Это различие, очевидно, обусловлено тем, что модуль упругости КМ, наполненного УВ, больше, чем у полимерного связующего, так как плотность обоих образцов мало различается. Температурный же коэффициент скорости ультразвука  $dv/dt$ , по-видимому, определяется свойствами связующего, поэтому он одинаков для обоих материалов.

Таким образом, установлена определенная связь между температурным ходом электропроводности и скорости ультразвука в исследованных КМ. Температурная зависимость скорости ультразвука не менее информативна, чем аналогичная зависимость для электропроводности. Что касается температуры стеклования, то, на наш взгляд, разработанный акустический метод позволяет определить ее в случае многокомпонентных систем точнее, чем электрофизический. Метод чувствителен к структурным изменениям вещества. В случае сложных композиций он более предпочтителен, так как непосредственно связан с упругими свойствами и плотностью и слабо зависит от наличия и распределения примесей, влияющих на электропроводность.

Дальнейшие исследования кинетики отверждения КМ были направлены на установление связи характера изменения скорости ультразвука с характером изменения степени отверждения. Под степенью отверждения понимается относительное количество нерастворимых фракций полимера в КМ; она характеризует наличие поперечных связей между длинными молекулами полимера, степень их сшивки. Это одна из важнейших характеристик КМ, и разработка экспресс-методов ее определения является чрезвычайно важной задачей. Наиболее распространено определение степени отверждения методом экстракции, при этом на исследование одной пробы уходит около суток.

В экспериментах непрерывно регистрировался сдвиг частоты ультразвуковых колебаний, прошедших через отверждающийся КМ. Далее по среднему за каждые 2 минуты сдвигу частоты  $\Delta f_{cp}$  рассчитывалась величина относительной скорости изменения скорости ультразвука в материале  $\beta = \frac{1}{v} \frac{dv}{dt} = \frac{v}{f_0 L_0} \Delta f_{cp}$  ( $v$  — текущее значение скорости ультразвука,  $f_0$  — частота зондирующего сигнала,  $L_0$  — акустическая база).

Другая часть исследуемого КМ отверждалась в отдельной емкости при такой же температуре, как и в кювете, и в определенные моменты времени (точки на рис. 4) из нее отбирались пробы для определения степени отверждения.

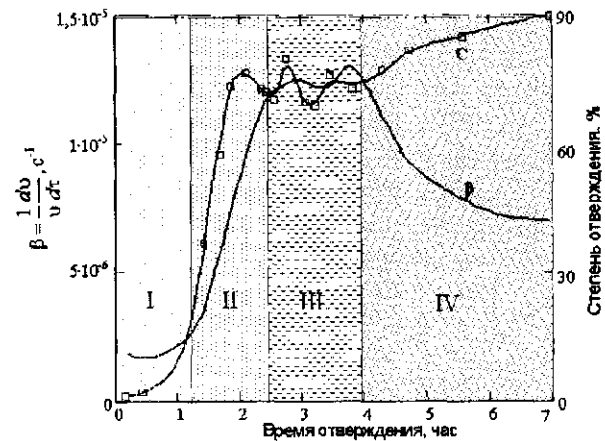


Рис. 4. Временные зависимости процесса отверждения композитного материала

Результаты измерений для одной композиции представлены на рис. 4. Временная зависимость параметра  $\beta$  носит сложный характер и по форме имеет сходство с кривой нарастания геле-фракции полимера (степени отверждения  $C$ ) до момента образования его густосетчатой структуры. На кривых можно выделить четыре участка: I — стадия до точки гелеобразования ( $\tau = 0 \div 1,25$  часа); II — период интенсивного роста цепей и образования трехмерной сетки после точки гелеобразования ( $\tau = 1,25 \div 2,5$  часа); III — участок высокоэластического состояния образовавшегося полимера (на этой стадии масса поддается формованию, легко режется ножом, резиноподобная) ( $\tau = 2,5 \div 4$  часа); IV — стадия образования жесткого полимера за счет дальнейшего структурирования системы ( $\tau = 4 \div 7$  и более часов), степень отверждения, однако растет незначительно, а кривая  $\beta(\tau)$  идет на спад.

Таким образом, описанный метод позволяет полностью охарактеризовать процесс отверждения по

стадиям. Он дает возможность определить точку гелеобразования, являющуюся важным технологическим показателем; максимум кривой  $\beta(\tau)$  характеризует завершенность процесса при данной температуре. На участке III возможно активное воздействие с целью получения формы изделия; на участке IV - изменение температурного режима отверждения для улучшения физико-механических свойств изделия и т.д.

*Исследование изменений диэлектрических свойств эпоксидной композиции*

Развитие исследований по определению диэлектрических характеристик композитных материалов объясняется физической взаимосвязью между ними и структурными параметрами композита. Важное место в этих исследованиях занимает определение диэлектрических свойств с помощью различных электроемкостных преобразователей, в том числе неразрушающим методом (без изготовления специальных образцов) и в условиях одностороннего доступа к поверхности изделия. В настоящее время разработаны теория таких преобразователей и принципы их конструирования [17]. Однако точность измерения диэлектрической проницаемости не всегда удовлетворительна, что обусловлено недостаточной точностью измерения параметров преобразователей и влиянием мешающих факторов. Один из путей решения проблемы подавления влияния мешающих воздействий – разделение контролируемых и неконтролируемых входных параметров. При этом представляется возможным более точно учесть влияние контролируемых воздействий путем повышения точности измерений параметров преобразователей, что можно достичь при использовании для измерений нестационарных частотно-фазовых методов исследования и контроля [18].

Для измерения диэлектрических характеристик материалов в качестве измерительного преобразователя используется фазосдвигающая цепь, содержащая накладной конденсатор, обеспечивающий односторонний доступ к контролируемому материалу [19]. Электроды измерительного конденсатора представляют собой концентрические пластины из латуни. Экспериментально исследованы глубина и ширина зоны контроля, что позволило выбрать размеры образцов в виде, исключая влияние краевых эффектов. Исследовано также влияние на результаты измерений зазора между плоским образцом и накладным конденсатором.

На рис. 5-6 представлены экспериментальные данные по кинетике отверждения композитных материалов, полученные с помощью емкостного датчика. Датчик накладного типа, одной обкладкой конденсатора служит плоское металлическое кольцо, второй – коаксиально расположенный внутри его металлический диск.

Кювета, в которую помещалось исследуемое вещество, представляет собой фторопластовый цилиндрический стакан с дном в виде тонкой (толщина 0,05 мм) натянутой фторопластовой пленки.

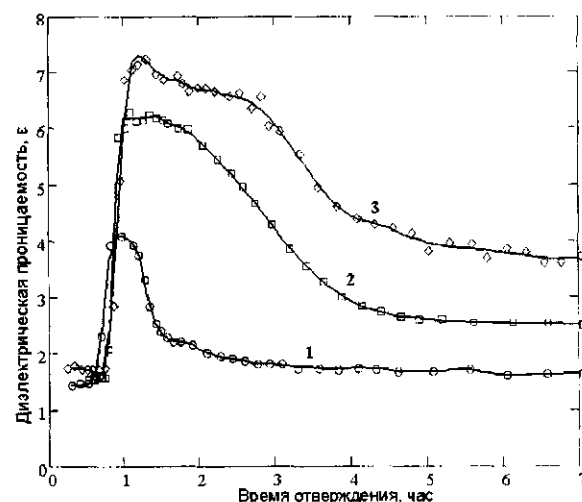


Рис. 5. Кинетика изменения диэлектрических свойств эпоксидной композиции (ЭД20: ЭДА: ЭТС = 100:10:25 вес. частей) в процессе отверждения с различным добавлением углеродного волокна (1 – 20, 2 – 30, 3 – 40 вес. частей)

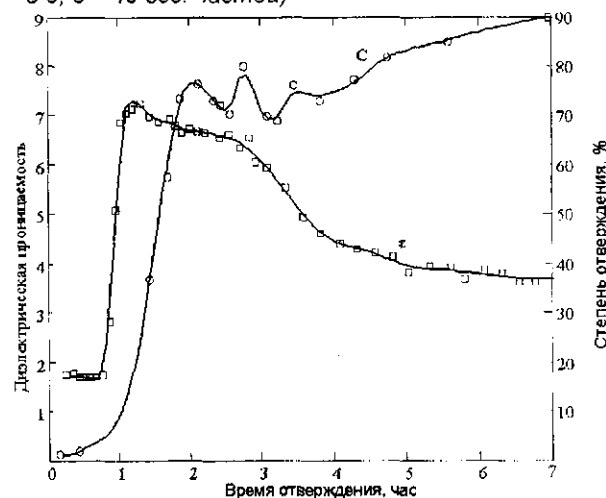


Рис. 6. Временные зависимости процесса отверждения композитного материала

Измерения проводились дискретно через определенные промежутки времени (точки на графиках) и состояли в том, что за время непрерывного счета (время усреднения, оно составляло 10 с) электронно-счетного частотомера измерительной системы с подключенным к ней емкостным датчиком кювета с исследуемым веществом ставилась на датчик. Нестационарный сдвиг частоты электрических колебаний на выходе преобразователя возникает при приближении исследуемого образца к обкладкам конденсатора, а интеграл от частотного сдвига по времени,

если процедура измерения (помещение образца на датчик) начинается и заканчивается в течение непрерывного счета частотомера, однозначно определяет диэлектрические свойства исследуемого материала.

### Заключение

С помощью автоматизированной измерительной системы выполнен комплекс исследований свойств и кинетики отверждения ряда композитных материалов. Выявлены особенности изменения различных свойств (акустических, электрофизических, тепловых) композитных материалов в процессе их отверждения. Установлено, что по величине частотного сдвига ультразвуковых колебаний, пропускаемых через композитный материал при его отверждении, можно судить о стадиях и степени отверждения композиции. Исследования позволили ускорить разработку и создание электропроводящих композитных материалов с комплексом заданных свойств, повысить точность измерений и неразрушающего контроля.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Светличный, В.М. Полиамиды и проблема создания современных конструкционных композиционных материалов/ В.М. Светличный, В.В. Кудрявцев // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2003. – Т. 45, № 6. – С. 984 –1036.
2. Аскадский, А.А. Компьютерное материаловедение полимеров/ А.А. Аскадский, В.И. Кондращенко. – М.: Научный мир, 1999. – 543 с.
3. Тугов, И.М. Химия и физика полимеров/ И.М. Тугов, Г.И. Кострыкина. – М.: Химия, 1989. – 430 с.
4. Иржак, В.И. Статистическая теория гелеобразования // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1975. – Т. 17, № 3. – С. 535 –545.
5. Бардзокас, Д.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры / Д.И. Бардзокас, А.И. Зобнин. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 376 с.
6. Васильев, В.В. Компьютерное моделирование структуры и набухания сеток, получаемых полимеризацией бифункциональных макромономеров / В.В. Васильев, С.А. Дубровский // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2003. – Т. 45, № 12. – С. 2063 –2077.
7. Аналитическая химия полимеров / Под ред. Г.Клайна. – М.: Мир, 1965. – Т. 1. – 591 с.
8. Липатова, Т.Э. Каталитическая полимеризация олигомеров и формирование полимерных сеток /

Т.Э. Липатова. – Киев: Наукова думка, 1974. – 204 с.

9. Методы исследования неметаллических материалов / Под ред. Б.И.Паншина, Б.В.Перова, М.Я. Шарова. – М.: Машиностроение, 1973. – Т. 3. – 196 с.
10. Ивановский, В.А. Электрические флуктуации в полимерных системах /В. А. Ивановский, Ю.В. Зеленев // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2002. – Т. 44 – № 12. – С. 2144 –2152.
11. Перепечко, И.И. Акустические методы исследования полимеров/ И.И. Перепечко. – М.: Химия, 1973. – 266 с.
12. Алексеенко, В.И. Ультразвуковой метод контроля процесса отверждения эпоксидной композиции / В.И. Алексеенко, В.И. Крылович, И.Н. Ермоленко, П.Н. Логвинович и др. // Заводская лаборатория. 1984. – №3. – С. 29 –32.
13. Крылович, В.И. Принципы построения средств неразрушающего контроля, основанных на нестационарных частотных методах измерения. В.И. Крылович, П.Н. Логвинович // Тез. докл. Первый Всесоюзный съезд технологов-машиностроителей. – М., 13-18 ноября 1989. – С. 102.
14. Ермоленко, И.Н. Исследование температурной зависимости скорости распространения ультразвука и электропроводности эпоксидной композиции с углеродным волокнистым наполнителем /И.Н. Ермоленко, В.И. Крылович, В.И. Алексеенко, П.Н. Логвинович и др. // ИФЖ. – 1982. – Т. 43 – № 3. – С. 413 – 417.
15. Лидьярд, А. Ионная проводимость кристаллов/А. Лидьярд. – М.: ИЛ, 1982. – 222 с.
16. Сажин, Б.И. Электрические свойства полимеров / Б.И. Сажин, А.М. Лобанов, О.С. Романовская и др.: Под ред. Б.И. Сажина. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, Ленингр. отд-ие, 1986. – 224 с.
17. Матис, И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля/ И.Г. Матис. – Рига: Зинатне, 1977. – 255 с.
18. А.с. 977933 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 В 7/02. Способ измерения геометрических размеров изделий / В.И. Алексеенко, В.И. Крылович, П.Н. Логвинович (СССР). – № 3251594/18-28; Заявлено 23.02.81; Опубл. 30.11.82, Бюл. № 44 // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 44.
19. Алексеенко, В.И. Неразрушающие измерения диэлектрической проницаемости материалов нестационарным частотно-фазовым методом/ В.И. Алексеенко, В.И. Крылович, П.Н. Логвинович// Механика композиционных материалов. – 1986. – № 1. – С. 153-157.