

УДК 532.133  
PACS 47.57. Ng, 47.70. Fw

## Экспериментальное исследование процессов отверждения эпоксидного связующего ЭД-20

В. Г. Гилев<sup>a</sup>, Л. А. Комар<sup>b</sup>, И. В. Осоргина<sup>a</sup>, А. Г. Пелевин<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

<sup>b</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН  
614013, Пермь, ул. Королёва, 1  
email: gvg@psu.ru

Выполнены экспериментальные исследования реологических свойств связующего композиционного материала на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя ТЭАТ. Реологические измерения проводились на ротационном реометре Physica MCR 501. Во всех измерениях использовалась геометрия «конус-плита». Показано, что температурные зависимости вязкости олигомера и отвердителя удовлетворительно описываются уравнением Аррениуса. Исследованы изменения реологических характеристик связующего в зависимости от температуры. Показано, что до температуры  $T \approx 50$  °С предельные напряжения сдвига связующего пренебрежимо малы. Построена зависимость изменения модуля накоплений связующего от времени полимеризации. Показано, что на заключительных стадиях полимеризации связующее подобно вязкоупругому телу. Определены время перехода из вязкого в вязкоупругое состояние и время затвердевания связующего в зависимости от температуры.

**Ключевые слова:** эпоксидная смола, реология, кинетика, температура

*Поступила в редакцию 18.10.2019; принята к опубликованию 28.10.2019*

## Experimental study of curing processes epoxy binder ED-20

V. G. Gilev<sup>a</sup>, L. A. Komar<sup>b</sup>, I. V. Osorgina<sup>a</sup>, A. G. Pelevin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

<sup>b</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

Ac. Korolev St. 1, 614013, Perm

email: gvg@psu.ru

Experimental studies of rheological properties of binder composite material based on epoxy resin ED-20 and hardener TEAT were performed. Rheological measurements were carried out on a rotational rheometer Physica MCR 501. The cone-plate geometry was used in all measurements. It is shown that the temperature dependences of the viscosity of the oligomer and the hardener are satisfactorily described by the Arrhenius equation. Changes of rheological characteristics of the binder depending on temperature are investigated. It is shown that up to the temperature  $T \approx 50$  °C the yield stress of the binder are negligible. The dependence of the change in the storage modulus of the binder on the polymerization time is constructed. It is shown that at the final stages of polymerization, the binder is similar to a viscoelastic body. The transition time from the viscous to the viscoelastic state and the solidification time of the binder depending on the temperature are determined.

**Keywords:** epoxy resin; rheology; kinetics; temperature

*Received 18.10.2019; accepted 28.10.2019*

doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-17-23

## 1. Введение

Полимерные материалы на основе эпоксидных смол, благодаря уникальности своих свойств находят широкое применение как в технологических процессах, так и в плане создания различных конструкций на их основе. Они обладают высокими диэлектрическими и прочностными показателями, радиационной стойкостью.

Предлагается, что эпоксидные композиции могут быть использованы для космических конструкций, которые внутренним давлением разворачиваются из транспортного состояния в рабочее и отверждаются непосредственно в космическом пространстве в условиях высокого вакуума и резких перепадов температур [1–5]. Проведение экспериментов непосредственно в космическом пространстве сопряжено с большими затратами. Поэтому необходимы предварительные наземные испытания, связанные с анализом различных аспектов, возникающих при изготовлении препрега, разворачивании и полимеризации готовой конструкции. Совокупность таких эмпирических данных дает «пищу» для моделирования реальных процессов отверждения эпоксидных композиций в космосе.

В литературе имеется довольно много работ, посвященных изучению процессов отверждения эпоксидных смол и композиций на их основе [6–8]. Физические и химические свойства конструкционных материалов к настоящему времени также достаточно хорошо изучены. В общей постановке кинетика отверждения реакционноспособных олигомеров является одной из центральных проблем, решение которой позволяет, во-первых, судить о химизме процесса; во-вторых, ввести количественные параметры для сравнения между собой различных материалов и, в-третьих, давать обоснованные прогнозы производительности и эффективности реальных технологических процессов.

В качестве экспериментальных методов исследования процесса структурирования эпоксидных олигомеров широко используются калориметрические, химические и спектроскопические методы, позволяющие, в ряде случаев, получать аналитические выражения, описывающие кинетику отверждения эпоксидных смол [9].

В то же время при практическом использовании клеевых композиций и композиционных материалов на их основе более эффективным является макрокинетический подход, основанный на наблюдении изменения во времени того или иного интегрального параметра, отражающего всю совокупность химических и физических превращений, происходящих при полимеризации олигомера. Для этого используются различные физические методы, в том числе реологический анализ, который, явля-

ясь методом слежения за ходом процесса полимеризации, позволяет определить ряд важных характеристик этого процесса [10].

В большинстве работ, использующих реологический метод, на основе анализа температурной зависимости эффективной вязкости строятся математические модели процесса отверждения, определяются кинетические параметры, энергия активации и положение геля-точки [11–13]. В то же время, как правило, не учитываются неньютоновские и вязкоупругие свойства связующего, наличие которых непосредственно влияет на процессы изготовления препрега и способность неотвержденного композиционного материала разворачиваться из транспортного контейнера в рабочее состояние.

В настоящей работе выполнены измерения вязких и вязкоупругих характеристик эпоксидного связующего в процессе полимеризации в зависимости от температуры среды. Актуальность проводимого исследования связана с изучением технологии изготовления крупногабаритных композиционных пневматических конструкций, подвергаемых отверждению в условиях космоса.

## 2. Объект исследования и подготовка образцов

В экспериментах использовались эпоксидная композиция «горячего отверждения» – эпоксидная смола ЭД-20 и отвердитель ТЭАТ (триэтанол аминотитанат), представляющий собой смесь продуктов 1-(н-бутокси)триэтаноламинтитаната и 1-(бис-(2-оксиэтил)-1-аминоэтокси)триэтаноламинтитаната и др., сертифицированные к применению в конструкционных композиционных материалах авиационного назначения. Смесь готовилась в весовом соотношении эпоксидной смолы к отвердителю в необходимых пропорциях. После приготовления смесь тщательно смешивалась в течение 1–2 мин электромеханическим смесителем и дополнительно 5–10 мин в ультразвуковой ванне Digital Ultrasonic Cleaner CD 4820 на частоте 40 кГц при комнатной температуре. Последняя операция способствует также дегазации смеси.

## 3. Детали эксперимента

Измерения массы растворов и их компонентов, необходимые для расчета концентрации смеси, выполнялись с помощью аналитических весов ЛВ-210А 2-го класса точности, абсолютная погрешность измерения которых составляла  $\pm 0.4$  мг.

Для измерения плотности образцов использовался цифровой вибрационный плотномер DMA 5000 M, обеспечивающий абсолютную погрешность измерений не более 0.000005 г/см<sup>3</sup>. Плотномер имеет встроенный термостат Пельтье, что позволяет исследовать температурные зависимости плотности.

Реологические измерения проводились на ротационном реометре Physica MCR 501. Такой прибор способен проводить реологические испытания в широком диапазоне постоянных и динамических тестов в режиме не только контролируемого напряжения сдвига (CS), но и контроля скорости сдвига (CR), начиная от измерения кривых течения и заканчивая динамическими анализами сложных жидкостей. Во всех измерениях использовалась система «конус–плита»: диаметр конуса  $d = 25$  мм, угол  $\alpha = 1^\circ$ . Используемая геометрия обеспечивает однородность градиента скорости сдвига в измерительном зазоре. С целью верификации данных отдельные измерения проводились с конусом диаметром 50 мм (угол раствора  $1^\circ$ ). Для поддержания и изменения температурного режима использовалось специальное температурное устройство Н-PTD 200 на основе эффекта Пельтье. В ходе эксперимента на рабочую поверхность плиты реометра помещалось около 0.07 мл раствора. Толщина слоя раствора по его внешнему радиусу составляла 0.047 мм, что обеспечивало быстрое установление рабочей температуры в образце даже в условиях тепловыделения, обусловленного реакцией полимеризации.

Основные измерения выполнены в условиях сдвигового деформирования по гармоническому закону с частотой 1 Гц в режиме контроля деформации, что позволяет оценить не только вязкие, но и вязкоупругие характеристики образцов. Для минимизации тепловых эффектов, обусловленных сдвиговым течением, измерения проводились по следующей программе: через равные промежутки времени снималась серия значений параметров в экспериментах с увеличивающейся амплитудой сдвигового деформирования. После этого выжидалось некоторое время (система находилась в покое) и вновь повторялась серия измерений. Процесс продолжался до момента, когда реакционная смесь не начинала оказывать сильное сопротивление сдвиговому деформированию.

#### 4. Результаты измерений и их анализ

Температурные зависимости плотности смолы и отвердителя в диапазоне температур от 20 до 80 °C показаны на рис. 1. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются выражениями вида:  $\rho_0 = -7.69 \cdot 10^{-4} T + 1.373$ ,  $\rho_c = -7.55 \cdot 10^{-4} T + 1.181$  для отвердителя (верхняя кривая) и смолы (нижняя кривая) соответственно. При подстановке в эти зависимости температуры в °C, размерность плотности – г/см<sup>3</sup>, погрешность аппроксимации не превышает 2%.

Процесс полимеризации конструкции, разворачиваемой в космическом пространстве, является неизотермическим. Поэтому важно оценить изменение вязкости связующего и его компонентов в зависимости от температуры и времени. Результаты

измерений температурных зависимостей эффективной вязкости смолы, отвердителя и связующего на их основе показаны на рис. 2. Измерения выполнены в режиме вращения при постоянном значении касательного напряжения  $\tau = 15$  Па. Скорость изменения температуры – 14 °C/мин. Отметим, что кривые течения смолы и отвердителя отвечают ньютоновской жидкости.

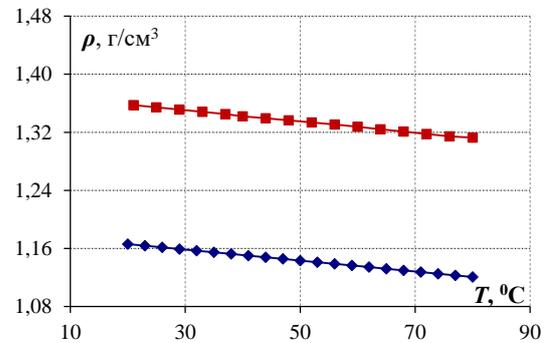


Рис. 1. Температурные зависимости плотности компонентов связующего

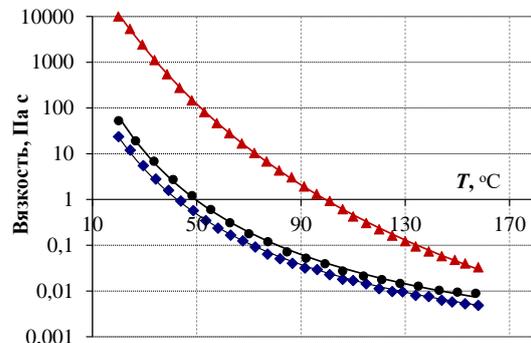


Рис.2. Температурные зависимости вязкости. Сверху вниз: отвердитель, связующее, смола

Сплошными линиями на рис. 2 представлены аппроксимации экспериментальных данных уравнением Аррениуса:

$$\eta_{\text{ЭДТ}} = 4.807 \cdot 10^{-8} \cdot \exp\left(\frac{3750.6}{T(K) - 149.74}\right),$$

$$\eta_{\text{ЭД-20}} = 77.42 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\left(\frac{852.1}{T(K) - 225.4}\right).$$

При подстановке в эти зависимости температуры в градусах Кельвина размерность вязкости – Па·с. Погрешность аппроксимации не превышает 3 %. Здесь же показана кривая изменения вязкости связующего, разведенного в соотношении 1:10 по массе.

Температура по-разному влияет на процесс отверждения связующего. С одной стороны, активационная природы вязкого течения приводит к уменьшению вязкости, в то время как процессы полимеризации вызывают нарастание вязкости. В общем случае зависимость  $\eta(t)$  носит экстремальный характер с минимумом в точке, в которой уменьше-

ние вязкости из-за повышения температуры уравновешивается вследствие возрастания вязкости, обусловленного реакцией отверждения материала. График изменения вязкости связующего в зависимости от времени полимеризации  $\eta(t)$  в процессе увеличения температуры среды показан на рис. 3.

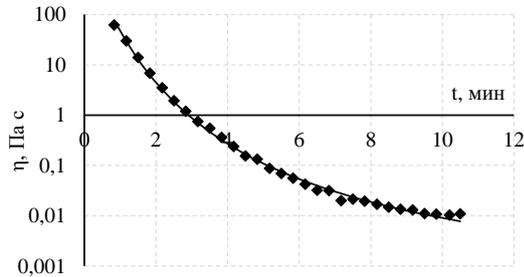


Рис.3. Зависимость вязкости связующего от времени полимеризации

Видно, что за время  $t \approx 10$  мин изменение вязкости обусловлено в основном изменением температуры смеси. Точки на графике – экспериментальные значения, сплошная линия – аппроксимация данных экспоненциальной зависимостью:

$$\eta = 13.53 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left(\frac{3377}{t(\text{сек}) + 204.9}\right).$$

Важными реологическими характеристиками связующего при изготовлении препрега (композиционного материала, пропитанного неотверждённым связующим) являются вязкость связующего и наличие предельных напряжений сдвига. Высокие значения вязкости так же, как и предельные напряжения сдвига, не позволяют осуществить эффективную пропитку композиционного материала. Поэтому необходимо оценить температурно-временные характеристики связующего, при которых предельные напряжения сдвига незначительны.

На рис. 4 показаны зависимости касательных напряжений  $\tau$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (т.н. кривые течения) связующего, измеренные в диапазоне температуры от 50 до 100 °С. В качестве управляющего параметра использовались касательные напряжения сдвига.

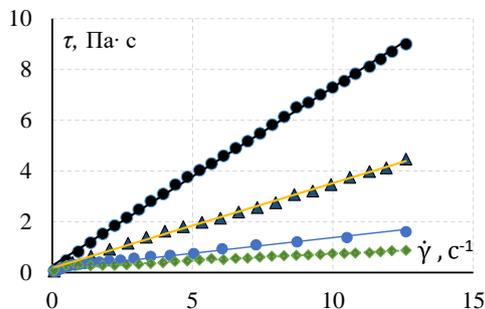


Рис. 4. Кривые течения связующего. Сверху вниз:  $T = 40, 50, 60, 80$  °С, соответственно. Линии – аппроксимация экспериментальных данных

Анализ кривых течения показывает, что до 40 °С кривые течения подобны ньютоновской жидкости.

При температурах 50 и 60 °С связующее проявляет предельные напряжения сдвига, которые составили 0.18 и 0.27 Па, соответственно. При температурах выше 60 °С кривые течения нелинейные. Таким образом, пропитку композиционного материала желательнее осуществлять при температуре не более 50 °С. При этом вязкость связующего более чем на порядок меньше соответствующего значения при комнатной температуре. В работе [14] было показано, что видимое отверждение материала, пропитанного аналогичным связующим, начинает наблюдаться спустя 13 суток после хранения при комнатной температуре.

При исследовании процессов полимеризации связующего в качестве основного был выбран динамический режим измерения при температуре 120 °С с отношением массы эпоксидной смолы ЭД-20 к массе отвердителя ТЭАТ 10:1, рекомендованном производителем.

Динамический режим измерения широко используется для описания вязкоупругого поведения полимерных систем. В этом режиме деформация  $\gamma$  задается по гармоническому закону  $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$ , где  $\gamma_0$  – ее амплитудное значение,  $\omega$  – циклическая частота. В области малых деформаций напряжения  $\tau$  также меняется по гармоническому закону  $\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta)$ , где  $\delta$  – угол сдвига фаз между напряжением и деформацией. Для анализа вязкоупругого поведения обычно вводят термин «комплексный модуль»  $G^*$ , который определяют, как  $G^* = \tau_0/\gamma_0$ . Величина  $G^*$  представляет собой общее сопротивление образца приложенной деформации. Комплексный модуль  $G^*$  может быть представлен следующим образом:  $G^* = G' + iG''$ . В этом выражении  $G'$  – модуль накопления или модуль упругости,  $G''$  – модуль потерь или модуль вязкости.

Основной реологической характеристикой, которая непосредственно влияет на процесс развертывания композитной конструкции из упакованного состояния в рабочее, является модуль накопления  $G'$ . Так, в работе [15] была показана взаимосвязь внутреннего давления развертывания цилиндрической оболочки и эффективного модуля упругости. На рис. 5 изображены рабочие графики зависимости модуля накопления от величины приложенной деформации  $\gamma$ .

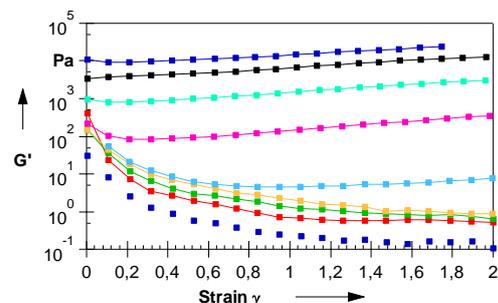
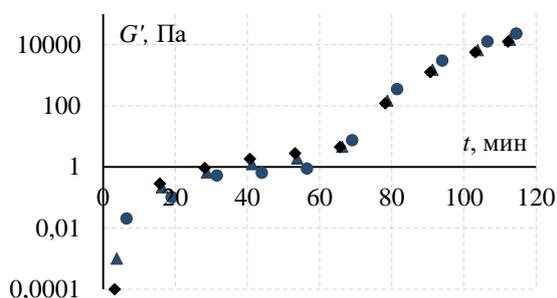


Рис. 5. Характер изменения модуля накопления. Снизу вверх:  $\Delta t = 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 51$  мин;  $T = 120$  °С

Здесь в процессе измерения производилась амплитудная развертка по  $\gamma$  в режиме гармонического деформирования. С целью минимизации тепловых эффектов, обусловленных сдвиговым течением, после получения каждой серии данных делался небольшой перерыв во времени для установления теплового равновесия. На измерение каждой серии точек уходило 4.75 мин. Экспериментальные данные на рис. 5 обозначены маркерами. Точки каждой серии измерений соединены на графике соответствующими сплошными линиями.

Для анализа экспериментальных данных были построены кривые изменения модуля накопления  $G'$  при фиксированных значениях величины деформации  $\gamma$  в зависимости от времени полимеризации. Эти результаты представлены на рис. 6.

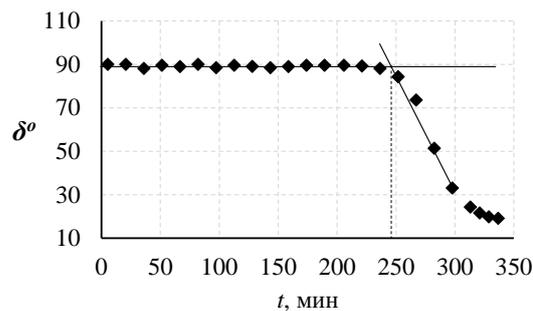


**Рис. 6.** Изменение модуля накоплений  $G'$  от времени полимеризации  $t$ :  $\blacklozenge$  –  $\gamma = 0.5$ ;  $\blacktriangle$  –  $\gamma = 1$  и  $\bullet$  –  $\gamma = 2$ ;  $T = 120^\circ\text{C}$

Видно, что значительное увеличение модуля накоплений наблюдается после 70 мин от начала процесса полимеризации связующего. До 70 мин отверждения модуль накопления  $G' < 8$  Па, т.е. это характерное время в течение, которого конструкция должна быть развернута в рабочее состояние.

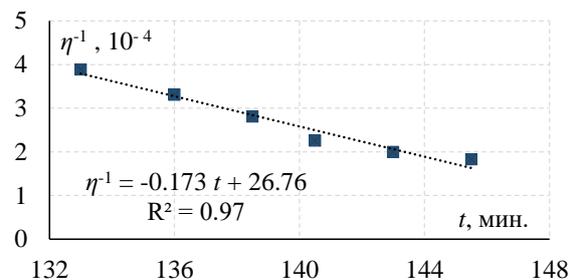
Процесс нарастания вязкости в процессе отверждения эпоксидных смол носит сложный характер, но в большинстве случаев чисто практический интерес представляет не весь диапазон изменения вязкости, а лишь критическая точка времени перехода связующего из вязкого в вязкоупругое состояние  $t^*$  и время затвердевания  $t_s$ .

Переход из вязкого в вязкоупругое состояние удобно определять, исследуя временную зависимость угла сдвига фаз  $\delta$ , на который заданная деформация опережает измеренное напряжение. Реакция тела называется упругой, если напряжение совпадает по фазе с деформацией. Если сдвиг угла между ними отличается на  $90^\circ$ , такое тело называют вязким. Если сдвиг фаз находится в пределах от 0 до  $90^\circ$ , тело называют вязкоупругим. На рис. 7 показаны примеры зависимости  $\delta(t)$  и методика определения  $t^*$ . Для этого по самому крутому участку кривой  $\delta(t)$  проводится линия до пересечения с прямой, соответствующей вязкому течению. Точка пересечения, спроецированная на ось времени, и будет критической точкой перехода из вязкого в вязкоупругое состояние  $t^*$ .

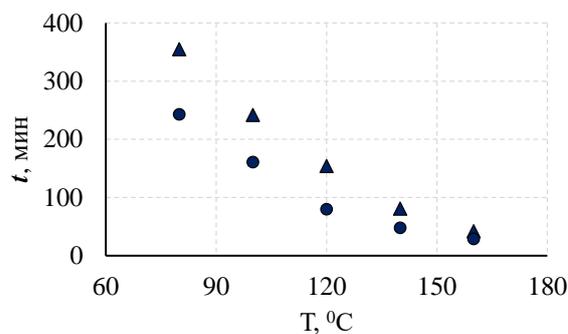


**Рис. 7.** Зависимость угла сдвига фаз от времени полимеризации;  $T = 80^\circ\text{C}$

Наиболее обоснованный способ определения времени затвердевания состоит в измерении максимально достижимого значения вязкости материала и построении зависимости обратной вязкости  $1/\eta$  на конечных стадиях отверждения [16]. Эта зависимость на заключительных стадиях эксперимента, как правило, хорошо аппроксимируется прямой, пересечение которой с осью абсцисс определяет момент достижения бесконечной вязкости.



**Рис. 8.** Методика определения времени затвердевания



**Рис. 9.** Зависимости времени перехода связующего в вязкоупругое состояние ( $\bullet$ ) и времени затвердевания ( $\blacktriangle$ ) от температуры

Пример обработки экспериментальных данных в координатах  $(1/\eta)(t)$  представлен на рис. 8. Здесь же показана линия тренда и приведено ее уравнение с указанием коэффициента детерминации  $R^2$ .

Сводные результаты расчетов критической точки перехода из вязкого в вязкоупругое состояние  $t^*$  и времени затвердевания в зависимости от температуры приведены на рис. 9.

## 5. Заключение

Выполнены экспериментальные исследования реологических свойств связующего композиционного материала на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя ТЭАТ.

Показано, что температурные зависимости вязкости олигомера и отвердителя удовлетворительно описываются уравнением Аррениуса.

Исследовано изменение реологических характеристик связующего в зависимости от температуры.

Измерены кривые течения связующего и составляющих его компонентов. Показано, что до температуры  $\approx 50$  °С предельные напряжения сдвига пренебрежимо малы.

Показано, что на заключительных стадиях полимеризации связующее подобно вязкоупругому телу. Определено характерное время, в течение которого, конструкция из композиционного материала должна быть развернута в рабочее состояние.

Определены время перехода из вязкого в вязкоупругое состояние и время затвердевания в зависимости от температуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ № 17-41-590649 и № 16-48-590844 p\_a.

## Список литературы

1. Гуняев Г. М., Душин М. И., Ивонин Ю. Н., Квачева Л. А., Михайлов В. В., Никишин Е. Ф., Старцев О. В. Влияние натурной экспозиции в космосе на физико-механические свойства углепластика // *Механика композитных материалов*. 1983. №2. С.211–215.
2. Старцев О. В., Руднев В. П., Ивонин Ю. Н., Никишин Е. Ф., Барбашев Е. А., Богатов В. А., Перов Б. В. Влияние натурной экспозиции в космосе на некоторые физические свойства органического стекла // *Высокомолекулярные соединения*. А. 1987. Т.29. №12. С. 2577–2584.
3. Кондюрин А. В., Месяц Г. А., Клячкин Ю. С. Создание крупногабаритной космической станции путем полимеризации композиционных материалов в свободном пространстве // *Пластические массы*. 1997. № 8. С. 25.
4. Briskman V. A., Yudina T. M., Kostarev K. G., Kondyurin A. V., Leontyev V. B., Levkovich M. G., Mashinsky A. L., Nechitailo G. S. Polymerization in microgravity as a new process in space technology//*Acta Astronautica*. 2001. Vol.48. N. 2–3. pp.169–180.
5. Кондюрин А. В., Нечитайло Г. С. Композиционный материал для надувных конструкций, фотоотверждающийся в условиях орбитального космического полета // *Космонавтика и ракетостроение*, 2009.Т.3 (56). С.182-190.
6. Иржак В. И., Розенберг Б. А., Ениколопан Н. С. Сетчатые полимеры. М.: Наука, 1979. 250 с.
7. Чернин И. З., Смехов Ф. М., Жердев Ю. В. Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 232 с.
8. Mitzel E., Koenig J. Epoxy resins and composites. Vol. 2. Berlin, 1986. 73 p.
9. Кондюрин А. В., Комар Л. А., Свистков А. Л. Моделирование кинетики реакции отверждения композиционного материала на основе эпоксидного связующего // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2010. Т.16, №4. С. 597–611.
10. Малкин А. Я., Куличихин С. Г. Реология в процессах образования и превращения полимеров. М.: Химия, 1985. 240 с.
11. Студенцов В. Н. Кинетика отверждения термоактивных смол и изменение их вязкости в процессе отверждения// *Пластические массы*. 2019. № 1–2. С. 24–26.
12. Косарев А. В., Студенцов В. Н. Структурная модель изменения вязкости в процессе отверждения эпоксидной смолы ЭД-20 // *Пластические массы*, 2019. № 1–2. С. 3–5.
13. Осипчик В. С., Горбунова И. Ю., Костромина Н. В., Олихова Ю. В., Буй Д. М. Исследование процессов отверждения эпоксидных олигомеров // *Химия и химическая технология*, 2014. Т.57. Вып.3. С.19–22.
14. Пелевин А. Г., Свистков А. Л., Комар Л. А. Исследование отверждения препрегов при комнатной температуре методом трехточечного изгиба // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2018. № 4 (42). С. 46–51. doi: 10.17072/1994-3598-2018-4-46-51
15. Gilev V. G., Rusakov S. V., Pestrenin V. M., Pestrenin I. V. Estimation of the cylindrical composite shell stiffness at the initial stage of curing during deployment by internal pressure. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no.1, pp. 93-99. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.1.08]
16. Malkin A. Ja. and Kulichikhin S. G. Rheokinetics of curing// *Adv. Polym. Sci.*, 1991. vol. 101. pp. 217–257.

## References

1. Gunyaev G. M., Dushin M. I., Ivonin Yu. N., Kvacheva L. A., Mihajlov V. V., Nikishin E. F., Starcev O. V. Vliyanie naturnoj ekspozicii v kosmose na fiziko-mekhanicheskie svojstva ugleplastika. *Mekhanika kompozitnyh materialov*, 1983, no. 2, pp. 211–215. (In Russian).
2. Starchev O. V., Rudnev V. P., Ivonin Yu. N., Nikishin E. F., Barbashev E. A., Bogatov V. A., Perov B. V. Vliyanie naturnoj ekspozicii v kosmose na nekotorye fizicheskie svojstva organicheskogo stekla. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*. A, 1987. vol.29. no.12. pp. 2577–2584. (In Russian).
3. Kondyurin A. V., Mesyac G. A., Klyachkin Yu. S. Sozdanie krupnogabaritnoj kosmicheskoy stancii putem polimerizacii kompozicionnyh materialov v

- svobodnom prostranstve. *Plasticheskie massy*, 1997. no. 8. pp. 25. (In Russian).
4. Briskman V. A., Yudina T. M., Kostarev K. G., Kondyurin A. V., Leontyev V. B., Levkovich M. G., Mashinsky A. L., Nechitailo G. S. Polymerization in microgravity as a new process in space technology. *Acta Astronautica*, 2001, vol. 48, no. 2–3. pp. 169–180.
  5. Kondyurin A. V., Nechitajlo G. S. Kompozicionnyj material dlya naduvnyh konstrukcij, fotootverzhdayushchij v usloviyah orbital'nogo kosmicheskogo poleta. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2009. vol. 3 (56), pp.182–190 (In Russian).
  6. Irzhak V. I., Rozenberg B. A., Enikolopyan N. S. *Setchatye polimery*. M.: Nauka, 1979. 250 p. (In Russian).
  7. Chernin I. Z., Smekhov F. M., Zherdev Yu. V. *Epoksidnye polimery i kompozicii*. Moscow: Himiya, 1982. 232 p. (In Russian).
  8. Mitzel E., Koenig J. *Epoxy resins and composites*, vol. 2. Berlin. 1986. 73 p.
  9. Kondyurin A. V., Komar L. A., Svistkov A. L. Modelirovanie kinetiki reakcii otverzhdeniya kompozicionnogo materiala na osnove epoksidnogo svyazuyushchego. *Mekhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij*, 2010, vol. 16, no. 4, pp.597–611. (In Russian).
  10. Malkin A. Ya., Kulichihin S. G. *Reologiya v processah obrazovaniya i prevrashcheniya polimerov*. M.: Himiya. 1985. 240 p. (In Russian).
  11. Studenczov V. N. Kinetika otverzhdeniya termoaktivnyx smol i izmenenie ix vyazkosti v processe otverzhdeniya. *Plasticheskie massy*. 2019. no. 1–2. pp. 24–26. (In Russian).
  12. Kosarev A. V., Studenczov V. N. Strukturnaya model izmeneniya vyazkosti v processe otverzhdeniya epoksidnoi smoly ED-20. *Plasticheskie massy*, 2019. no. 1–2. pp. 3–5. (In Russian).
  13. Osipchik V. S., Gorbunova I. Yu., Kostromina N. V., Olihova Yu. V., Buj D. M. Issledovanie processov otverzhdeniya epoksidnyh oligomerov. *Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2014. T. 57, no. 3. pp. 19–22. (In Russian).
  14. Pelevin A. G., Svistkov A. L., Komar L. A. Study of prepregs curing at room temperature by three-point bending method. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 4 (42), pp. 46–51. doi: 10.17072/1994-3598-2018-4-46-51.
  15. Gilev V. G., Rusakov S. V., Pestrenin V. M., Pestrenin I. V. Estimation of the cylindrical composite shell stiffness at the initial stage of curing during deployment by internal pressure. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no.1, pp. 93-99.
  16. Malkin A. Ja. and Kulichihin S. G. Rheokinetics of curing. *Advances in Polymer Science*, 1991, vol. 101, pp. 217–257.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Гилев В. Г., Комар Л. А, Осоргина И. В., Пелевин А. Г. Экспериментальное исследование процессов отверждения эпоксидного связующего ЭД-20 // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 4. С. 17–23. doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-17-23

**Please cite this article in English as:**

Gilev V. G., Komar L. A, Osorgina I. V., Pelevin A. G. Experimental study of curing processes epoxy binder ED-20. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 4, pp. 17–23. doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-17-23