

УДК 53.087.44  
PACS 01.50.Mu

## Исследование отверждения препрегов при комнатной температуре методом трехточечного изгиба

А. Г. Пелевин<sup>a,b</sup>, А. Л. Свистков<sup>a,b</sup>, Л. А. Комар<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15  
smile3k@yandex.ru

<sup>b</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН  
614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1

Целью данного исследования является анализ периода хранения и скорости отверждения препрегов при комнатной температуре. Препреги – это ткани, пропитанные эпоксидной смесью. Рассматривается процесс отверждения эпоксидной смеси горячего отверждения вместе с капроновым связующим в виде ленты при комнатной температуре в течение 36 дней. Приведены результаты экспериментов методом трехточечного изгиба на разрывной машине Testometric 115 для 30 образцов и восьми контрольных дней измерения. Анализ результатов этих экспериментов показал, что наблюдаемое отверждение препрегов начинается с 13-го дня после их изготовления.

**Ключевые слова:** эпоксидная смола; отвердитель; препрег; трехточечный изгиб.

*Поступила в редакцию 22.10.2018; принята к опубликованию 07.11.2018*

## Study of prepregs curing at room temperature by three-point bending method

A. G. Pelevin<sup>a</sup>, A. L. Svistkov<sup>a,b</sup>, L. A. Komar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm  
email: smile3k@yandex.ru

<sup>b</sup> ICMM UrB RAS 614013, Perm, Akademika Koroleva st., 1

The aim of this study was to analyze the storage period and curing rate of prepregs at room temperature. A prepreg is a fabric impregnated with an epoxy mixture. The article considers the process of curing the epoxy mixture of hot curing together with a nylon binder in the form of a tape at room temperature for 36 days. The results of experiments by three-point bending on the tensile testing machine Testometric 115 for 30 samples and eight control days of measurement are presented. Analysis of the results of these experiments showed that the observed curing of prepregs begins from 13 days after their manufacture.

**Keywords:** epoxy resin; hardener; prepreg; three-point bend.

*Received 22.10.2018; accepted 07.11.2018*

doi: 10.17072/1994-3598-2018-4-46-51



## 1. Введение

Препреги – это композиционные материалы, состоящие из тканей высокой прочности (стекловолокно, углеволокно), пропитанных неотвержденным полимерным связующим. В качестве связующего используют термореактивные или химически отверждаемые эпоксидные смолы. Отверждение связующего зависит от различных факторов, таких как температура [1], СВЧ-излучение [2, 3] и др. Так, в работах [4,5] показано, что добавление углеродных нанотрубок в связующее приводит к изменению кинетики отверждения реактопластов. Согласно исследованию [6] добавки углеродных нанотрубок к эпоксидной смоле замедляют процесс полимеризации. В работе [7] продемонстрировано, что использование ультразвука на полимерную композицию в смеси с отвердителем сокращает время полимеризации. В данном исследовании предложен метод определения степени полимеризации связующего в препреге при длительном хранении.

## 2. Подготовка исследуемых образцов

Для изготовления препрега заготавливалась капроновая стропа шириной 50 мм, длиной 2100 мм и толщиной 1 мм.

В качестве связующего была выбрана смесь эпоксидной смолы ЭД-20 (10 массовых долей) и ТЭАТ-1 (1 массовая доля). Смесь подогревалась до 55°C для увеличения текучести. Далее происходила пропитка стропы связующим. Для этого стропа была обернута плотным полиэтиленом, запаянным в рукав, внутрь которого было залито связующее. Связующее было равномерно распределено внутри рукава, а остатки выдавлены с помощью валика. Затем полученная стропа была нарезана на 30 образцов длиной 7 см.

Исследуемое связующее имеет период полного отверждения равный двум часам при температуре 140°C. В данной работе показано механическое поведение препрега с данным связующим при длительном хранении.

Для испытаний образцов был разработан следующий план экспериментальных работ. Образцы были разделены на 6 партий (П1–П6) по 5 штук в каждой. Испытания образцов проводились методом трехточечного изгиба на разрывной машине Testometric 115 в следующем порядке:

Образцы П1 были испытаны в 1, 5, 9, 13, 18, 22, 26 и 36-м днях; образцы П2 – в 1, 9, 13, 18, 22, 26 и 36-м днях (5-й день пропущен); образцы П3 – в 1, 13, 18, 22, 26 и 36-м днях (5, 9-й дни пропущены); образцы П4 – в 1, 18, 22, 26 и 36-м днях (5, 9, 13-й дни пропущены); образцы П5 – в 1, 22, 26 и 36-м днях (5, 9, 13, 18-й дни пропущены).

Образцы П6 были испытаны в 1, 26 и 36 дни (5, 9, 13, 18, 22 дни пропущены).

Данный порядок испытаний был выбран на основании предположения о том, что испытания на изгиб могут необратимо повреждать образцы, поэтому для сравнения образцы из партии П1 испытывались чаще остальных и должны накопить больше повреждений, чем образцы из других партий.

Фото эксперимента на трехточечный изгиб представлено на рис. 1. Образец помещается на опоры 2 и 4. Расстояние между опорами – 60 мм. Каждый образец продавливался индентором на 6 мм. Скорость деформирования была 50 мм в минуту. После деформирования образцы выравнивались. Для этого они выкладывались между двух металлических пластин, сверху которых была положена гиря в 20 кг. Так образцы хранились до следующего эксперимента. Температура хранения на протяжении всех дней была 18–22°C.



Рис. 1. Фото эксперимента на трехточечный изгиб на разрывной машине Testometric 115: 1 – образец, 2 и 4 – опоры

### 3. Обработка результатов эксперимента

В результате испытаний для каждого образца строилась зависимость нагрузки индентора от его смещения. На рис. 2 красной линией представлены результаты эксперимента для образца 1 в первый день испытания, черной пунктирной линией – касательная прямая к результатам эксперимента на начальном участке деформирования, синей штрихпунктирной линией обозначена прямая максимальной нагрузки образца. Тангенс угла наклона касательной прямой обозначен величиной  $S1$ ; максимальная нагрузка – величиной  $S2$ .

Для каждого образца в партии были получены величины  $S1$  и  $S2$ . Для каждой партии образцов определялись средние значения величин  $S1$  и  $S2$ , обозначенные их  $M1$  и  $M2$  соответственно.

На рис. 3 красными линиями обозначены результаты экспериментов всех образцов из П1 за все дни. Пунктирной линией черного цвета – величина  $M1$ , штрихпунктирной линией синего цвета – величина  $M2$ .

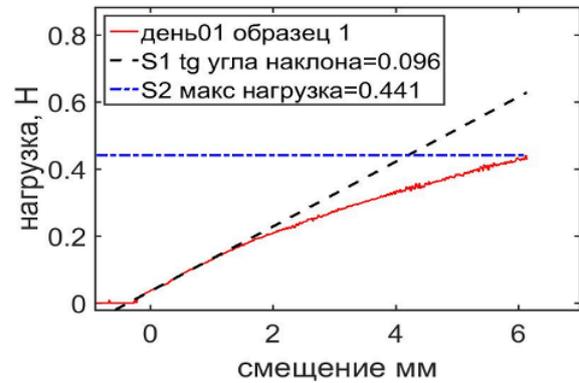


Рис. 2. Результаты экспериментов для одного образца из партии П1

Для остальных партий образцов были получены подобные результаты (в статье они не приводятся).

Из данных, приведенных на рис. 3, можно построить график изменения по дням средних значений  $M1$  для образцов П1. Величины  $M1$  обозначены синими снежинками, максимальные и

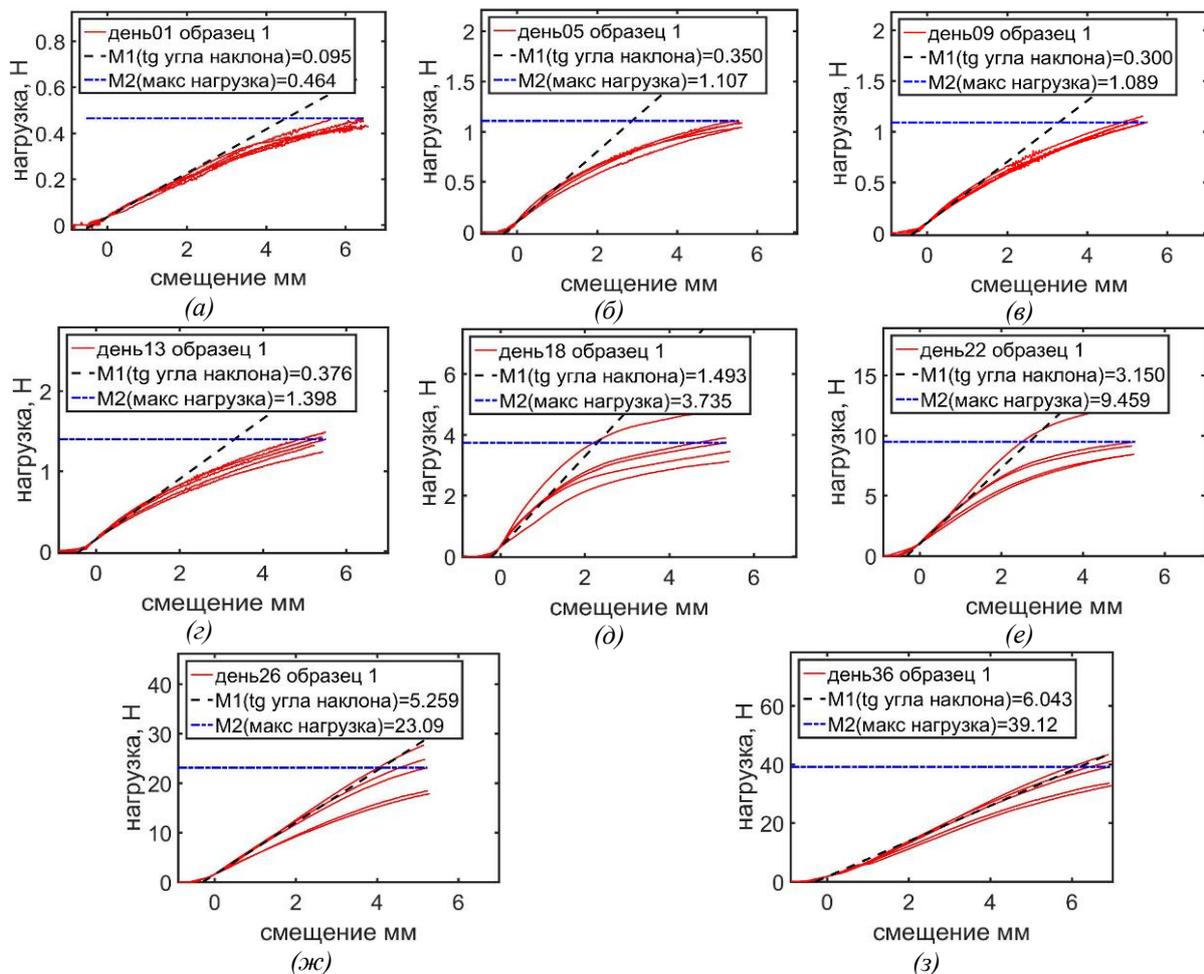


Рис. 3. Результаты экспериментов для партии образцов П1: а – день 1-й; б – день 5-й; в – день 9-й; г – день 13-й; д – день 18-й; е – день 22-й; ж – день 26-й; з – день 36-й

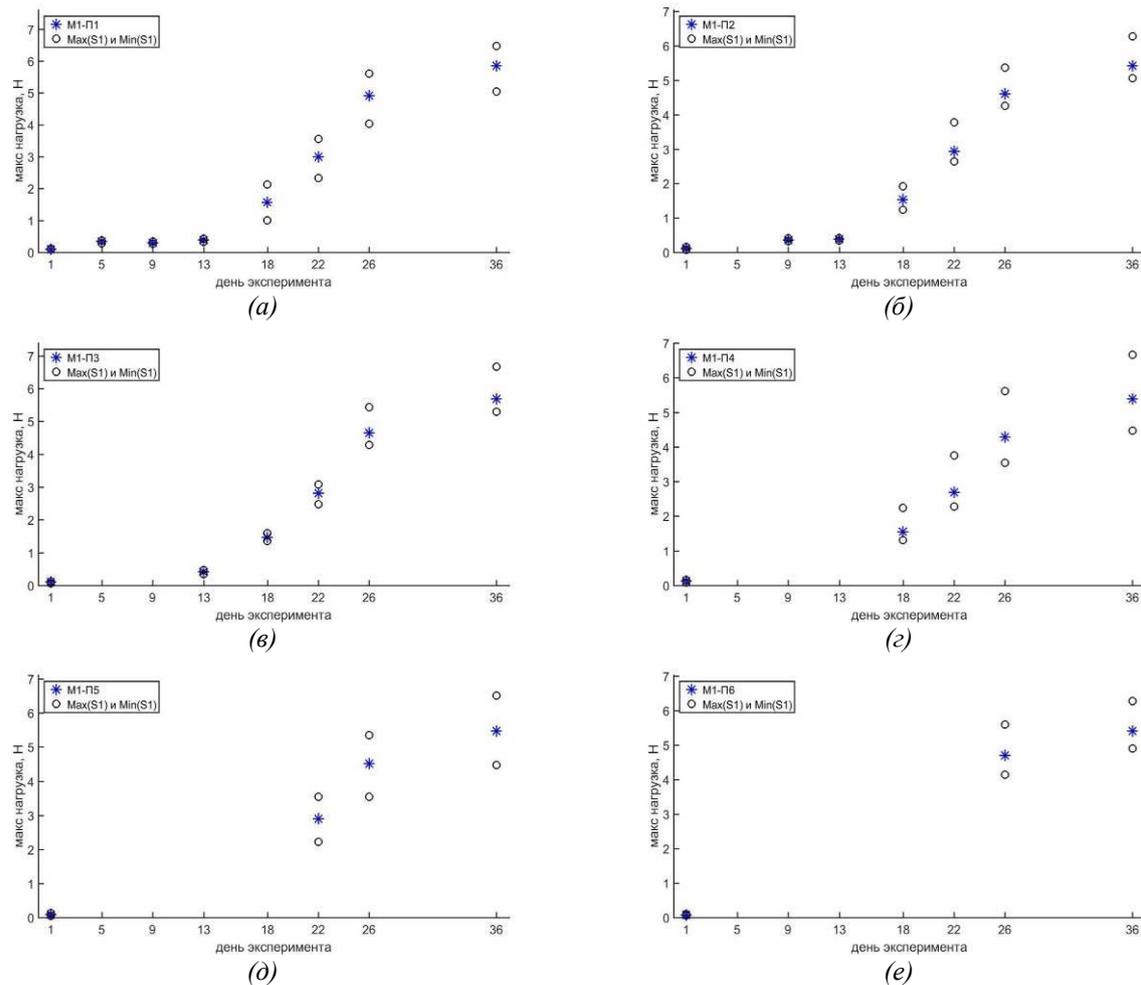


Рис. 4. Величины M1 для испытанных партий образцов: а – П1; б – П2; в – П3; г – П4; д – П5; е – П6

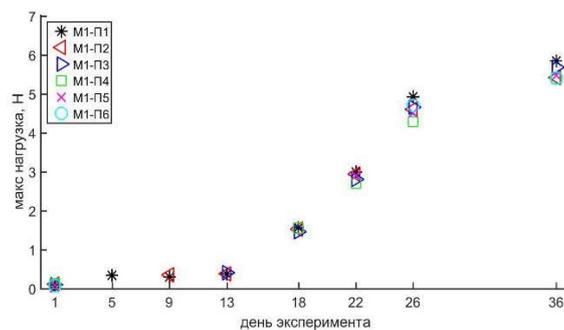


Рис. 5. Величины M1 образцов всех партий П1–П6

минимальное значение тангенса угла наклона в партии – черными кружками (рис. 4). Подобные графики составлены для всех партий образцов П2-П6. На рис. 5 показан сводный график значения M1 для всех партий образцов.

Хорошо видно, что величина M1 для всех партий имеет близкие значения. Значение M1 начинает расти с 13-го дня эксперимента. После 26-го дня рост замедляется, что может быть связано с завершением процесса полимеризации.

Теперь рассмотрим зависимости средних значений величины M2 для образцов всех партий П1-П6. Величины M2 обозначены снежинками синего цвета, максимальное и минимальное значения максимальной нагрузки в партии – кружками черного цвета (рис. 6).

На сводном графике значений параметра M2 рис. 7 хорошо видно, что его величины для всех партий имеют близкие значения. Значение M2 начинает расти с 13-го дня эксперимента.

#### 4. Полученные выводы

1. До 13-го дня испытаний отверждение в образцах не наблюдается. Видимое отверждение начинается происходить после 13-го дня.

2. Образцы из партий П5 и П6 испытывались значительно реже остальных, однако не показали более высокую прочность по сравнению с остальными. Т.е., при продавливании образцов индентором на 6 мм накопления повреждений в образцах не произошло.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-48-590844 р\_а.

#### Список литературы

1. *Pascault J. P., Sautereau H., Verdu J., Williams R. J. J. Thermosetting polymers.* N.-Y.: Marcel Dekker AG, 2002. 477 p.
2. *Papargyris D. A., Day R. J., Nesbitt A., Bakavos D. Comparison of the mechanical and physi-*

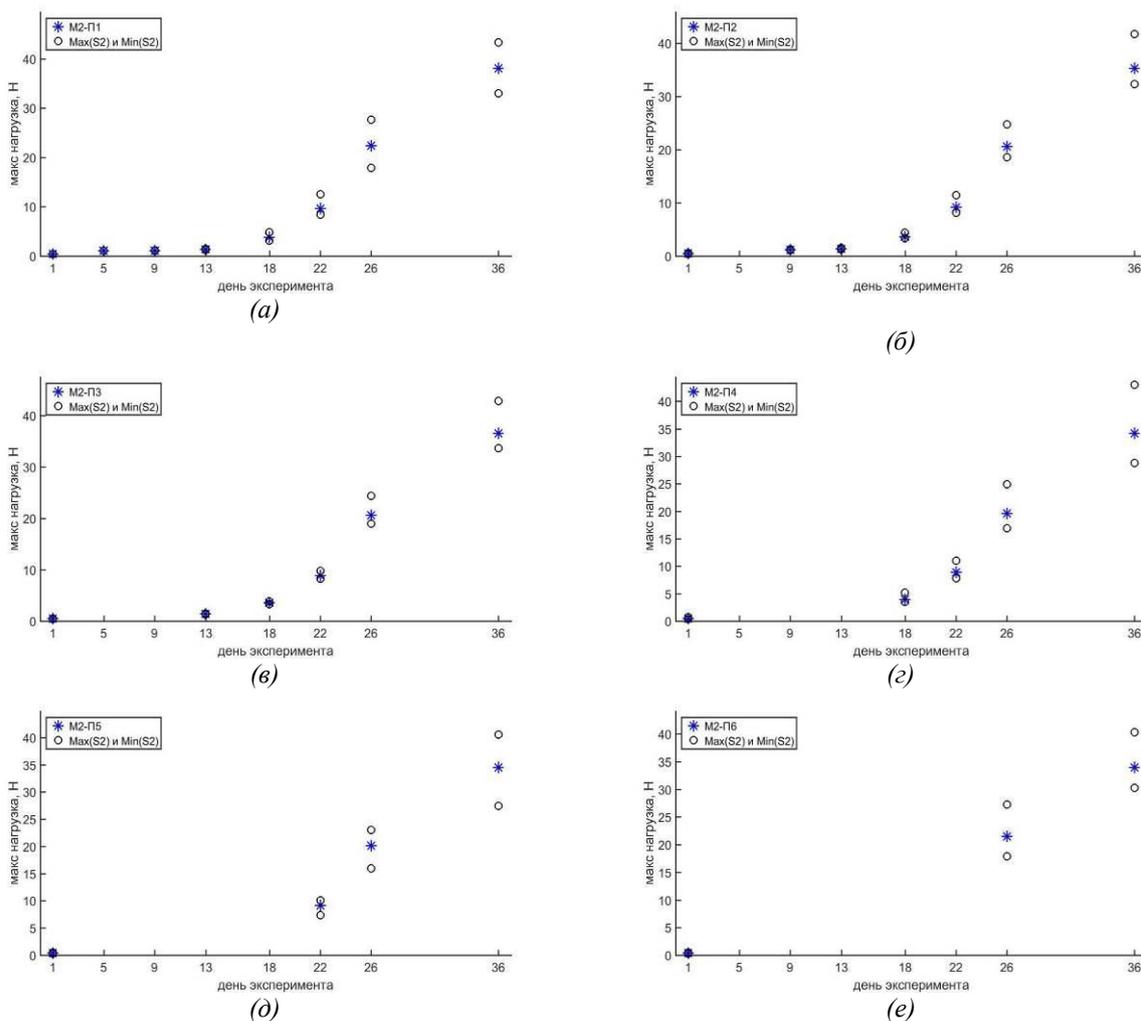


Рис. 6. Величины  $M2$  для испытанных партий образцов: а – П1; б – П2; в – П3; г – П4; д – П5; е – П6

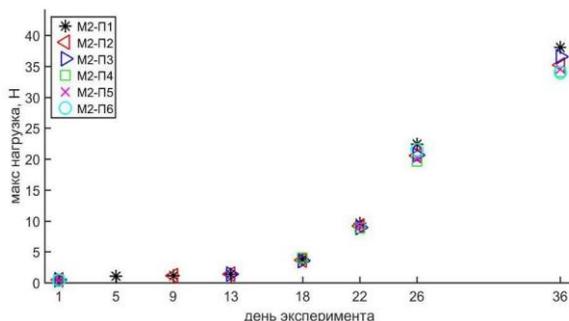


Рис. 7. Величины  $M2$  образцов всех партий П1–П6

- cal properties of a carbon fibre epoxy composite manufactured by resin transfer moulding using conventional and microwave heating // *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68. N. 7–8. P. 1854–1861.
3. Слухай А. В. Влияние воздействия СВЧ электромагнитного поля на эпоксидный компаунд // *Вопросы электротехнологии*. 2013. № 1 (1). С. 31–33.
  4. Allaoui A., Bounia N.E. How carbon nanotubes affect the cure kinetics and glass transition temperature of their epoxy composites? – A review // *Express Polymer Letters*. 2009. Vol. 3. N. 9. P. 588–594.
  5. Хасков М.А., Большаков В.А., Меркулова Ю.И., Гребенева Т.А. Влияние углеродных нанотрубок на кинетические аспекты отверждения термореактивных связующих на примере эпоксидных смол // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2015. Т. 58. № 7. С. 58–62.
  6. Хасков М.А., Гребенева Т.А., Бабин А.Н. Влияние добавок углеродных нанотрубок на кинетику отверждения эпоксидных смол до и после застекловывания // *Композиты и наноструктуры* 2014. Т. 6. № 1. С. 49–64.
  7. Khmelev V. N., Golykh R. N., Shalunov A. V., Bazhin V. E., Nesterov V. A. Determination of optimum conditions of ultrasonic cavitation treatment of high-viscous and non-Newtonian liquid media // *EDM'2015: Conference Proceedings*. 2015. P. 208–212.
  2. Papargyris D. A., Day R. J., Nesbitt A., Bakavos D. Comparison of the mechanical and physical properties of a carbon fibre epoxy composite manufactured by resin transfer moulding using conventional and microwave. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, no. 7–8, pp. 1854–1861.
  3. Sluhai A. V. Influence of effects of microwave electromagnetic fields on an epoxy *Questions Electrotechnology*. 2013, no. 1 (1), pp. 31–33.
  4. Allaoui A., Bounia N. E. How carbon nanotubes affect the cure kinetics and glass transition temperature of their epoxy composites? – A review. *Express Polymer Letters*, 2009, vol. 3, no. 9, pp. 588–594.
  5. Hasco M. A., Bolshakov V. A., Merkulova Yu. I., Grebeneva T. A. Vliianie uglirodnykh nanotrubok na kineticheskie aspekty otverzhdennia termoreaktivnykh svyazuiushchikh na primere epoksidnykh smol (An effect of carbon nanotubes on kinetics of solidification of thermosetting binder by epoxy resin example). *Russian Journal of chemistry and chemical technology*, 2015, vol. 58, no. 7, pp. 58–62 (In Russian)
  6. Khaskov M. A., Grebeneva T. A., Babin A. N. The influence of carbon nanotubes on the kinetics of epoxy curing before and after vitrification. *Composites and Nanostructures*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 49–64 (In Russian).
  7. Khmelev V. N., Golykh R. N., Shalunov A. V., Bazhin V. E., Nesterov V. A. Determination of optimum conditions of ultrasonic cavitation treatment of high-viscous and non-Newtonian liquid media. *EDM'2015: Conference Proceedings*, 2015, pp. 208–212.

## References

1. Pascault J.P., Sautereau H., Verdu J., Williams R.J.J. *Thermosetting polymers*. N-Y.: Marcel Dekker AG. 2002. P. 477.

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

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

## Please cite this article in English as:

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