

ИЗДАЕТСЯ С ИЮЛЯ 2004 Г.

# КЛЕИ, ГЕРМЕТИКИ В ТЕХНОЛОГИИ 9 1 2017

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

**Орган Института химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН**

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Журнал вошел в Russian Science Citation Index (RSCI) на базе Web of Science

### Редакционная коллегия:

**Главный редактор**  
академик РАН А.А. Берлин

### Заместители главного редактора:

А.П. Петрова, д-р техн. наук, проф.,  
Г.В. Мальшева, д-р техн. наук, проф.

### Члены редколлегии:

- |  |   |
|--|---|
| Аниховская Л.И., канд. техн. наук      | Новаков И.А., академик РАН                    |
| Аронович Д.А., канд. хим. наук         | Осипчик В.С., д-р техн. наук                  |
| Бабаевский П.Г., д-р техн. наук, проф. | Резниченко С.В., д-р техн. наук, проф.        |
| Войтович В.А., канд. техн. наук        | Симонов-Емельянов И.Д., д-р техн. наук, проф. |
| Гладков С.А.                           | Стоянов О.В., д-р техн. наук, проф.           |
| Горбаткина Ю.А., д-р физ.-мат. наук    | Строганов В.Ф., д-р хим. наук, проф.          |
| Ковалевский М.А., канд. эконом. наук   | Угрюмов С.А., д-р техн. наук                  |
| Кульков А.А., д-р техн. наук, проф.    | Хайруллин И.К., канд. техн. наук              |
| Луконин В.П., д-р техн. наук, проф.    | Чалых А.Е., д-р хим. наук, проф.              |
| Масленков С.Б., д-р техн. наук, проф.  | Ширшин К.В., д-р хим. наук, проф.             |
| Минаков В.Т., д-р техн. наук, проф.    |   |
| Морозов Ю.Л., д-р техн. наук, проф.    |   |

**Научный редактор**  
Еселева Л.И.

Адрес редакции:  
105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60  
Тел. редакции: 8 (495) 988-98-67; 8(495) 988-98-65  
E-mail: admin@nait.ru; korhimk@nait.ru  
http://www.nait.ru

За достоверность информации и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.  
При использовании материалов журнала в любой форме ссылка на журнал обязательна.

© ООО «Наука и Технологии», 2017



С 2007 г. журнал переводится на английский язык и выпускается издательством "Pleiades Publishing, Ltd" как приложение к журналу "Polymer Science, Series D", распространение которого осуществляет издательство "Springer".

Переводная версия журнала входит в международные реферативные базы данных систем цитирования (индексирования): Academic OneFile, Chemical Abstracts Service (CAS), El-Compendex, Expanded Academic, Google Scholar, INSPEC, OCLC, PASCAL, SCImago, SCOPUS, Summon by Serial Solutions.

### СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

- Пучков А.Ф., Третьякова Н.А., Мамин Э.А., Спиридонова М.П.** Конформационные превращения  $\epsilon$ -капролактама как его прерогатива при получении молекулярных комплексов, используемых в клеевой технологии . . . . . 2
- Нелюб В.А., Бородулин А.С.** Свойства эпоксидных материалов, применяемых для изготовления стеклопластиков методом намотки . . . . . 7
- Заикин А.Е., Старостина И.А., Стоянов О.В.** Синергическое действие смеси олигомера 2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолина и нефтеполимерной смолы на адгезию хлорбутилкаучука к стали . . . . . 13
- Чухланов В.Ю., Селиванов О.Г., Чухланова Н.В.** Герметик на основе полидиметилсилоксана, модифицированного оксидом галлия . . . . . 19

### МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ИСПЫТАНИЙ

- Старцев В.О., Куцевич К.Е., Хрулёв К.А., Молоков М.В.** Прогнозирование температуры поверхности образцов композиционных материалов на основе клеевых препрегов при экспонировании в климатических условиях . . . . . 24

### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

- Тюменева Т.Ю., Когтёнков А.С., Шарова И.А., Лукина Н.Ф.** Клеи для крепления износостойкого материала ВТП-1В к алюминиевым сплавам и стеклопластику. . . . . 32
- Угрюмов С.А.** Модификация карбамидоформальдегидных смол олеиновой кислотой для производства плитных материалов конструкционного назначения на основе костры льна . . 35

## В НОМЕРЕ

### ИНФОРМАЦИЯ

- Доклад президента Ассоциации производителей клеев и герметиков И.К. Хайруллина на отчетно-перевыборной конференции 2017 года . . . . . 39**
- Новости литературы . . . . . 43**

УДК 642.17;678

## СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ МЕТОДОМ НАМОТКИ\*

В.А. Нелюб, канд. техн. наук, А.С. Бородулин\*\*

МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5; \*\*e-mail: asb@emtc.ru)

Статья поступила 04.05.2017

*Представлены результаты исследований физико-механических свойств импортных (D.E.R. 330) и отечественных (ХТ-711) эпоксидных матриц, в том числе модифицированных полисульфоном или полиэфиримидом. Показано, что температура стеклования эпоксидных композиций на основе смолы ХТ-711, отвержденной изо-МТГФА, может достигать 190 °С и превышает температуру стеклования импортных связующих на 15–30 °С. Модуль упругости композиций на основе смолы ХТ-711 выше модуля упругости матриц на основе смолы D.E.R. 330 на 40–60%. Все исследованные эпоксидные матрицы проявили высокую стойкость по внешнему виду к кислотам, щелочам, нефтепродуктам и воде, а композиции ХТ-711 + изо-МТГФА + теплостойкий термопласт продемонстрировали меньшую в 5–6 раз потерю массы по сравнению с импортными матрицами.*

**Ключевые слова:** эпоксидные матрицы, физико-механические свойства, модифицирование

### Введение

**П**ри освоении трудноизвлекаемых запасов нефти, добыче в арктических условиях и на осложненном фонде скважин нефтедобывающие компании сталкиваются с проблемой коррозионного износа стальных труб. В результате возникает необходимость регулярной замены трубопроводов и эксплуатационных колонн, частота которой определяется коррозионной активностью транспортируемых сред и почвы. Более привлекательными по сравнению со стальными трубами выглядят трубы из стеклопластика. При этом прочность и пределы эксплуатации таких изделий в значительной степени зависят от полимерной матрицы. Как правило, для изготовления стеклопластиков используют эпоксидные связующие, которые способны обеспечить готовому изделию не только необходимую прочность, но и устойчивость к эксплуатационным факторам (температу-

ре, агрессивным средам, трещиностойкости и т.п.) [1, 2]. Часто отечественные предприятия используют для производства стеклопластиков импортные связующие. В связи с этим особый интерес представляет подбор отечественных связующих, которые по своим свойствам не только не уступают, но и превосходят импортные материалы. В настоящее время для увеличения эксплуатационных характеристик используют многокомпонентные полимерные системы, в состав которых кроме основной смолы и отвердителя входят модифицирующие добавки, придающие специфические свойства [3–5]. Один из перспективных способов модифицирования матрицы — добавление в нее теплостойких термопластов. В ряде работ показано, что введение жесткоцепных термопластов в эпоксидные матрицы заметно увеличивает их трещиностойкость, устойчивость к агрессивным средам, в некоторых случаях и теплостойкость [6, 7]. В настоящей работе проведено исследование эпоксидных матриц, в том числе модифицированных термопластичными полимерами, с целью замены аналогичных импортных полиэпоксидов, применяемых для изготовления изделий из стеклопластиков.

\* Работа выполнена в рамках государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, осуществляемой в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 (Договор № 02. G25.31.0186 от 27.04.2016 г.).

### Объекты и методы исследования

Для проведения исследований использовали связующие на основе эпоксидной смолы ХТ-711 (фирма «Химекс Лимитед», Россия) и отвердителя — *изо*-метилтетрагидрофта-левого ангидрида (*изо*-МТГФА). Для сравнения свойств предложенных и импортных композиций использовали эпоксидную смолу D.E.R. 330 (Dow Chemical Company), в качестве отвердителей — ароматический амин D.E.H. 650 (Dow Chemical Company) и циклоалифатический диамин Polurox IPD (Dow Chemical Company). Соотношение эпоксидной смолы и отвердителя D.E.H. 650 составляло 100:26 мас. ч., D.E.R. 330 и Polurox IPD — 100:24 мас. ч. В качестве модификаторов композиции ХТ-711 + *изо*-МТГФА использовали полисульфон ПСК-1 (НИИ ПМ, Россия) или полиэфиримид Ultem-1010 (GE Plastics). Теплостойкие полимеры ПСК-1 и Ultem-1010 растворяли в эпоксидной смоле ХТ-711 при 100–120 °С в течение 2–5 ч при непрерывном перемешивании. Содержание ПСК-1 и Ultem-1010 составляло 10% от общей массы композиции. Далее связующее охлаждали до 60–80 °С и добавляли отвердитель *изо*-МТГФА. Соотношение смолы и отвердителя составляло 100:100 мас. ч.

Образцы на основе эпоксидных связующих изготавливали свободным литьем в силиконовые формы. Непосредственно перед заливкой образцов связующее вакуумировали несколько раз в течение 5–15 мин при 50 °С для удаления пузырьков воздуха, образовавшихся при смешивании. После заливки связующие на основе ХТ-711 отверждали по ступенчатому режиму: 80 °С — 2 ч, 110 °С — 2 ч, 130 °С — 5 ч. Режим отверждения для связующих на основе D.E.R. 330: 80 °С — 30 мин, 120 °С — 30 мин, 180 °С — 60 мин. После извлечения образцов из форм проводили механообработку на шлифовальном станке. В результате получили два вида образцов для физико-механических испытаний. Для испытаний на динамическом механическом анализаторе использовали образцы прямоугольной формы 30×5×2 мм, при испытании на растяжение — образцы в виде лопа-

ток с сечением рабочей части 2×5 мм и длиной рабочей части 35 мм.

Испытания прямоугольных образцов проводили при трехточечном изгибе на динамическом механическом анализаторе Netzsch Artemis DMA 242E. Диапазон изменения температур составил от 30 до 300 °С, частота приложения внешней нагрузки — 1 Гц. В процессе испытания записывали изменение модуля упругости  $E$  и тангенса угла механических потерь  $\tan \delta$ . Для каждой эпоксидной композиции испытывали не менее трех образцов.

Растяжение образцов в виде лопаток проводили на испытательной машине Zwick Z-100 при постоянной температуре (25 °С) и скорости нагружения 1 мм/мин. Деформацию определяли с помощью экстензометра. Из полученных диаграмм нагружения устанавливали прочность при растяжении  $\sigma_r$ , модуль упругости  $E$  и деформацию при разрушении  $\epsilon_r$ . Для каждой эпоксидной композиции испытывали шесть образцов.

Дополнительно исследовали стойкость эпоксидных матриц к агрессивным средам: воде дистиллированной, гидроксиду натрия (чда), кислоте соляной (конц., хч) и керосину (ТС-1). В качестве образцов использовали захватные части лопаток, испытанных на растяжение. Масса каждого из образцов составляла около 1 г. Для измерения химической стойкости образцы эпоксидных матриц помещали в банку с герметично закрывающейся крышкой объемом 20 мл, заполненную агрессивной химической средой. Выдержку проводили при (23±2) °С в течение 3 сут. Затем образцы вынимали, промывали водой (образцы, обработанные раствором гидроксида натрия, соляной кислотой) или гексаном (образцы, обработанные керосином) до полного смывания химического реагента с поверхности, высушивали в сушильном шкафу при 70 °С в течение 4 ч.

Химическую стойкость определяли по формуле:

$$\Delta m = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta m$  — количественная мера химической стойкости, выраженная в процентах;  $m$  —

масса образца после воздействия агрессивной химической среды;  $m_0$  — исходная масса образца.

Образец связующего считали химически стойким по отношению к агрессивной среде, если  $|\Delta m| < 1\%$ . Оценивали также и внешний вид образцов.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 и 2 показаны зависимости изменения модуля упругости  $E$  и  $\operatorname{tg} \delta$  в зависимости от температуры. Для всех эпоксидных композиций характерно плавное снижение модуля упругости с ростом температуры. При достижении температуры фазового перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое происходит резкое падение модуля упругости. Пик тангенса угла механических потерь, представленный на рис. 2, показывает точную температуру фазового перехода. Следует отметить, что для двухфазных систем ХТ-711 + ПСК-1 или ХТ-711 + Ultem-1010 на зависимости присутствует только один пик тангенса. Этот факт можно объяснить тем, что температуры стеклования обеих фаз очень близки и метод не позволяет увидеть фазовый переход для каждого компонента отдельно.

В табл. 1 представлены результаты термомеханического анализа исследованных эпоксидных матриц. Модуль упругости при комнатной температуре для эпоксидной смолы D.E.R. 330, отвержденной D.E.H. 650 или Polyrox IPD, составляет 2,5 и 2,8 ГПа соответственно и находится на уровне для большинства эпоксидных материалов. Эпоксидная смола ХТ-711, отвержденная *изо*-МТГФА, имеет модуль упругости на уровне

4 ГПа, что на 30—40% выше, чем у эпоксидных матриц на основе D.E.R. 330. Введение в ХТ-711 теплостойких термопластов приводит к незначительному (на 3—7%) снижению модуля упругости. Однако значения модуля упругости для модифицированных композиций выше импортных на 30%. Значения температуры стеклования для эпоксидных матриц D.E.R. 330 + D.E.H. 650 и D.E.R. 330 + Polyrox IPD составляют 176 и 160 °С соответственно. Следует отметить, что такие температуры стеклования для эпоксидных композиций являются достаточно высокими. Например, для эпоксидных смол типа ЭД-20 удается достичь температуру стеклования не более 150 °С. Эпоксидная смола ХТ-711 демонстрирует еще большую температуру стеклования, которая составляет 190 °С. Применение в качестве модификатора системы ХТ-711 + *изо*-МТГФА полисульфона ПСК-1 практически не меняет температуру стеклования. Кажется неожиданным результат модифицирования ХТ-711 полиэ-

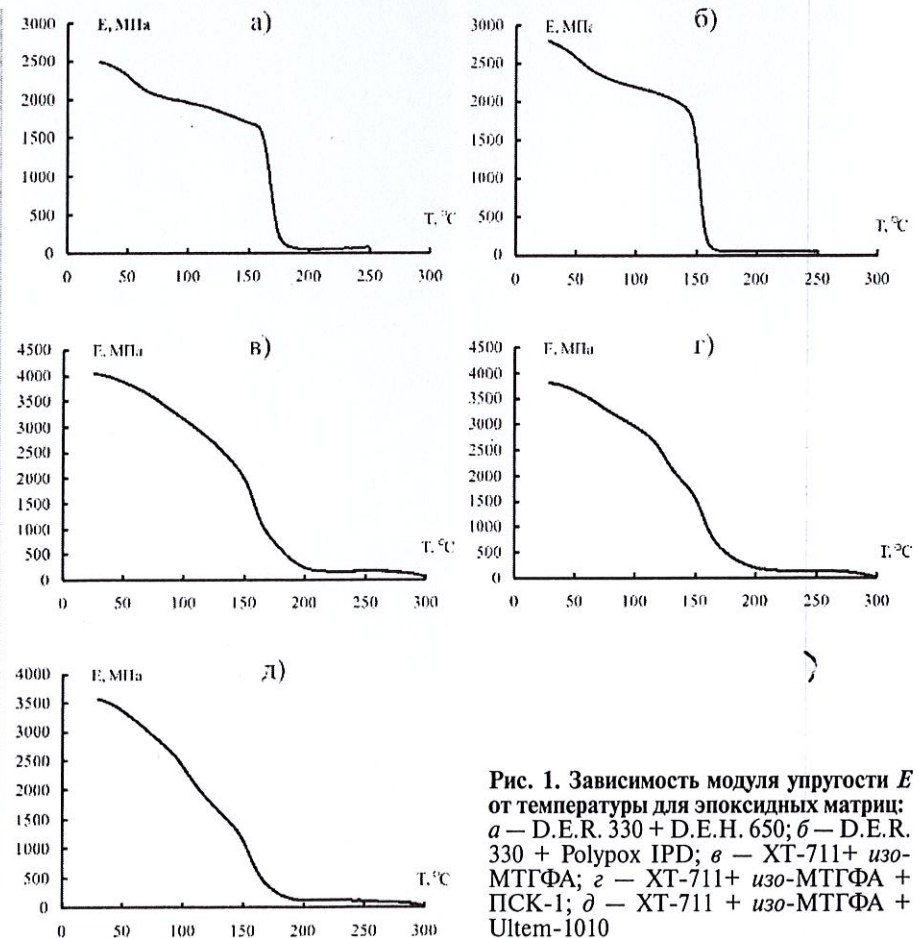


Рис. 1. Зависимость модуля упругости  $E$  от температуры для эпоксидных матриц: а — D.E.R. 330 + D.E.H. 650; б — D.E.R. 330 + Polyrox IPD; в — ХТ-711 + *изо*-МТГФА; г — ХТ-711 + *изо*-МТГФА + ПСК-1; д — ХТ-711 + *изо*-МТГФА + Ultem-1010

фиримидом. Температура стеклования этой композиции снижается на 13 °С, при том что температура стеклования собственно полиэфиримида составляет 210 °С. Этот вопрос требует дальнейшего исследования. Следует обратить внимание, что резкое снижение модуля упругости у всех исследованных композиций наблюдается в районе 150 °С. Однако при такой температуре максимальный модуль имеет композиция ХТ-711 + *изо*-МТГФА, который составляет 2,01 ГПа при 150 °С. Это композиция выглядит гораздо перспективнее при реализации теплоустойкости по сравнению с другими исследованными матрицами. Возможно, что при оптимизации процесса отверждения уже готового изделия удастся еще больше повысить теплоустойчивость системы.

На рис. 3 показаны типичные диаграммы нагружения эпоксидных матриц при растя-

### 1. Температура стеклования и модуль упругости эпоксидных матриц, определенные методом ДМА

Композиция	Модуль упругости при 25 °С, ГПа	$T_g$ , °С (по $\text{tg } \delta$ )	Модуль упругости при 150 °С, ГПа	$T_g$ , °С (по $E$ )
D.E.R. 330 + D.E.H. 650	2,55	176	1,65	155
D.E.R. 330 + Polyrox IPD	2,79	160	1,96	145
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА	4,04	190	2,01	150
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + ПСК-1	3,82	187	1,67	148
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + Ultem-1010	3,57	177	1,18	150

жении. Из диаграмм видно, что эпоксидные матрицы D.E.R. 330 + D.E.H. 650 и D.E.R. 330 + Polyrox IPD обладают небольшим участком, соответствующим упругой деформации, и большой долей неупругой деформации, которая выражается в нелиней-

ном росте напряжения с увеличением деформации. Эпоксидные матрицы на основе смолы ХТ-711 деформируются упруго практически до момента разрушения. Модифицирование ХТ-711 теплоустойкими термопластами не приводит к существенному изменению диаграмм нагружения. В табл. 2 представлены результаты испытаний эпоксидных матриц. Прочность исследованных эпоксидных матриц не зависит от типа отвердителя и модификатора и составляет около 70 МПа. Такая прочность при растяжении характерна для большинства полиэпоксидов. Так же как при динамическом механическом анализе, модуль упругости матриц D.E.R. 330 + D.E.H. 650 и D.E.R. 330 + Polyrox

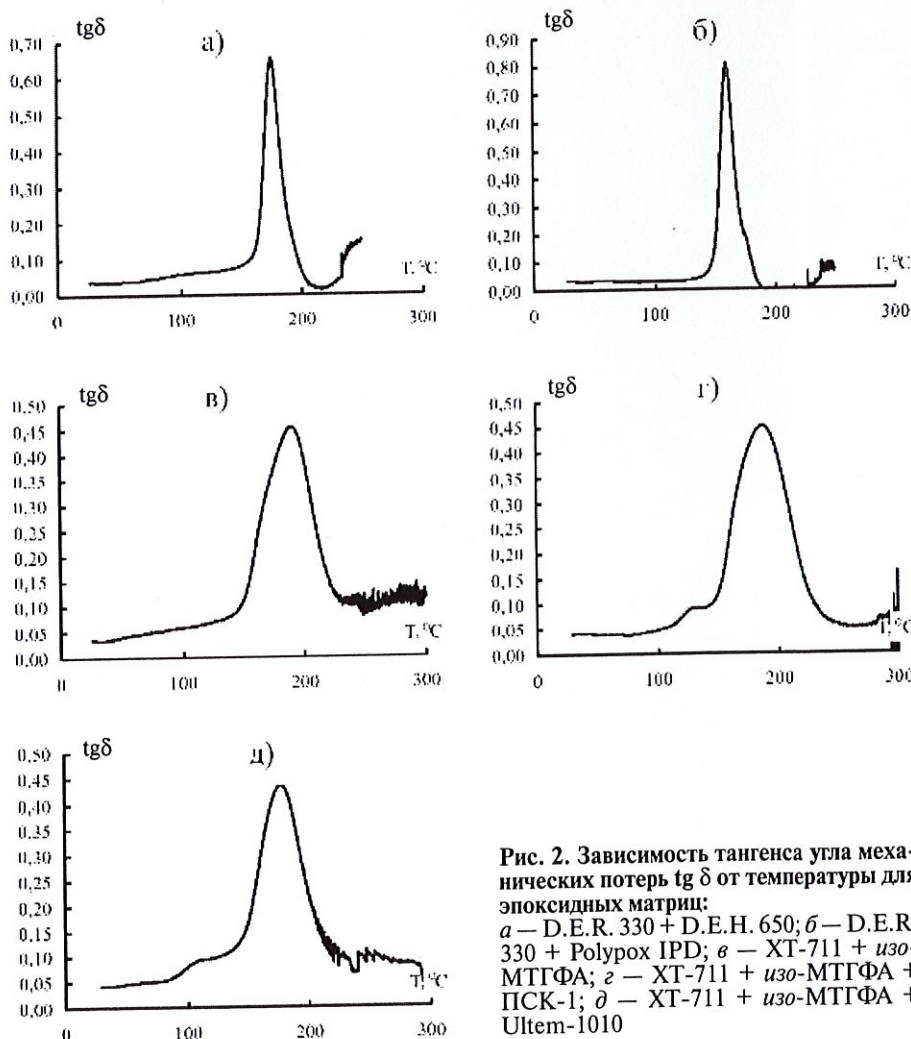


Рис. 2. Зависимость тангенса угла механических потерь  $\text{tg } \delta$  от температуры для эпоксидных матриц: а — D.E.R. 330 + D.E.H. 650; б — D.E.R. 330 + Polyrox IPD; в — ХТ-711 + *изо*-МТГФА; г — ХТ-711 + *изо*-МТГФА + ПСК-1; д — ХТ-711 + *изо*-МТГФА + Ultem-1010

IPD на 40—60% ниже, чем у эпоксидных матриц на основе ХТ-711. Следует отметить, что импортные эпоксидные матрицы более деформативные. Предельная деформация при разрушении составляет около 8%. Эпоксидные матрицы на основе смолы ХТ-711 менее деформативные. Предельная деформация составляет около 5% и практически не зависит от типа модифицирующей добавки.

Результаты исследований эпоксидных матриц к действию агрессивных сред представлены на рис. 4 и в табл. 3. Из рис. 4 видно, что внешний вид под воздействием агрессивных сред не изменился, т.е. на образцах не видно следов травления или отложения химических веществ. Это подтверждается изменением массы образцов после выдержки, представленной в табл. 3. Для всех типов полимерных матриц изменение массы составило менее 1%, что свидетельствует о высокой химической стойкости исследованных эпоксидных матриц. Следует отметить, что эпоксидная матрица ХТ-711, модифицированная термостойкими термопластами, остается практически неизменной под действием агрессивных сред. Так, изменения массы та-

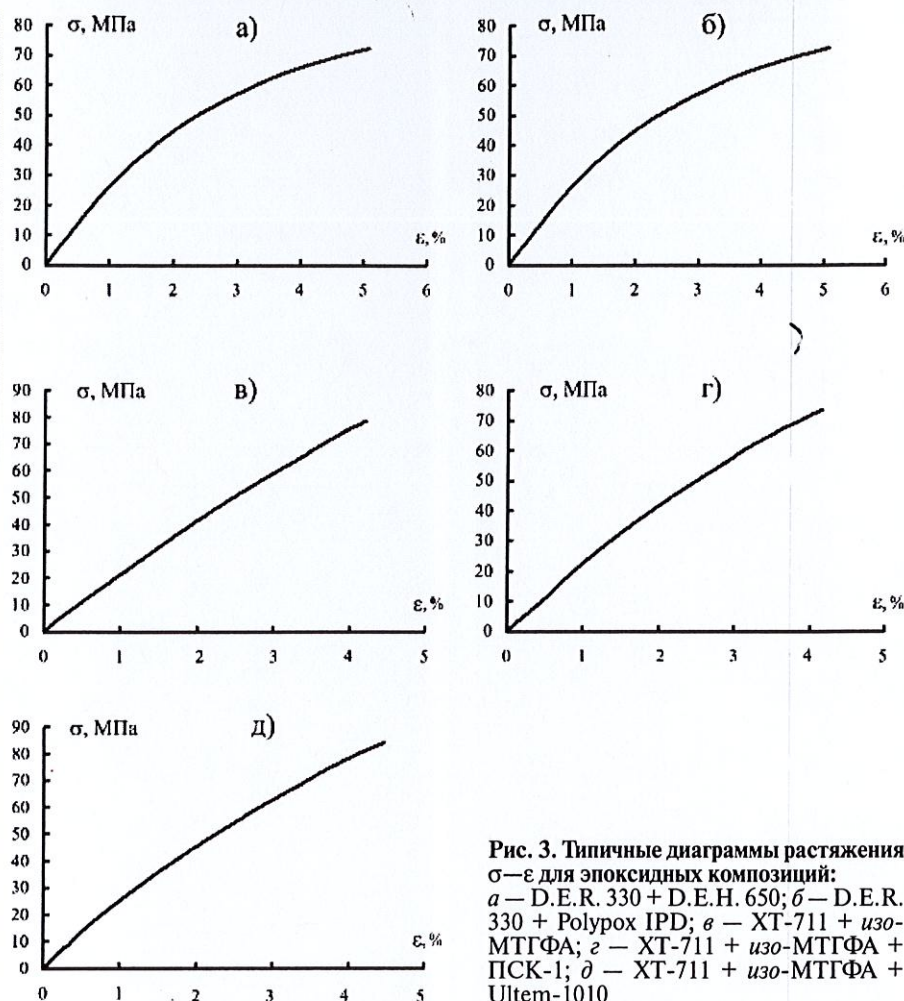


Рис. 3. Типичные диаграммы растяжения  $\sigma$ — $\epsilon$  для эпоксидных композиций: а — D.E.R. 330 + D.E.H. 650; б — D.E.R. 330 + Polyrox IPD; в — ХТ-711 + *изо*-МТГФА; г — ХТ-711 + *изо*-МТГФА + ПСК-1; д — ХТ-711 + *изо*-МТГФА + Ultem-1010

ких образцов при выдержке в соляной кислоте, гидроксиде натрия и керосине составили 0,02—0,05%, что находится на уровне статистической ошибки. Импортные смолы имеют большее изменение массы: при выдержке в кислоте изменение массы доходит до 0,5%, в керосине — до 0,2%.

## 2. Свойства эпоксидных матриц при растяжении

Композиция	$\sigma_p$ , МПа	$E$ , ГПа	$\epsilon_p$ , %
D.E.R. 330 + D.E.H. 650	72±2	3,0±0,1	7,7±0,8
D.E.R. 330 + Polyrox IPD	68±2	2,9±0	8,0±0,7
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА	75±4	5,4±0,3	4,7±0,4
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + ПСК-1	74±3	4,3±0,2	5,9±0,4
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + Ultem-1010	77±7	4,9±0,4	4,8±0,6

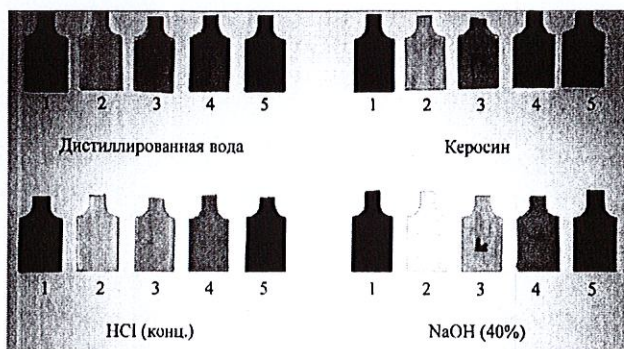


Рис. 4. Воздействие агрессивной среды на внешний вид образцов, выполненных из эпоксидных композиций: 1 — D.E.R. 330 + D.E.H. 650; 2 — D.E.R. 330 + Polyrox IPD; 3 — ХТ-711 + *изо*-МТГФА; 4 — ХТ-711 + *изо*-МТГФА + ПСК-1; 5 — ХТ-711 + *изо*-МТГФА + Ultem-1010

## 3. Химическая стойкость эпоксидных матриц

Композиция	Агрессивная среда	Изменение внешнего вида	$\Delta m, \%$
D.E.R. 330 + D.E.H. 650	Вода дистиллированная	Без изменения	-0,01
D.E.R. 330 + Polyrox IPD			0,02
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА			0,05
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + ПСК-1			0,07
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + Ultem-1010	Натрия гидроксид (чда)		-0,01
D.E.R. 330 + D.E.H. 650			-0,15
D.E.R. 330 + Polyrox IPD			-0,28
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА			-0,02
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + ПСК-1	Кислота соляная (конц., хч)		-0,06
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + Ultem-1010			0
D.E.R. 330 + D.E.H. 650			0,58
D.E.R. 330 + Polyrox IPD			0,45
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА	Керосин (ТС-1)		0,06
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + ПСК-1			0,04
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + Ultem-1010			0,04
D.E.R. 330 + D.E.H. 650			-0,18
D.E.R. 330 + Polyrox IPD			-0,16
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА			-0,02
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + ПСК-1			-0,05
ХТ-711 + <i>изо</i> -МТГФА + Ultem-1010			-0,02

## Выводы

Изучены физико-механические свойства импортных и отечественных эпоксидных матриц. Показано, что температура стеклования эпоксидных композиций на основе ХТ-711 и *изо*-МТГФА может достигать 190 °С и превышает температуру стеклования импортных связующих на 15–30 °С. Прочность при растяжении исследованных эпоксидных матриц составляет 75 МПа и соответствует прочностям большинства эпоксидов. При этом модуль упругости композиций на основе ХТ-711 выше модуля упругости матриц на основе D.E.R. 330 на 40–60%. Все исследованные эпоксидные матрицы проявили высокую стойкость к кислотам, щелочам, нефтепродуктам и воде. Водопоглощение всех исследованных композиций не превышает 0,07%. Следует

отметить высокую стойкость к кислотам и нефтепродуктам композиций ХТ-711 + *изо*-МТГФА + теплостойкий термопласт по сравнению с базовыми матрицами. Потеря массы в этом случае в 5–6 раз меньше, чем для базовых систем. Совокупность полученных физико-механических свойств матриц на основе эпоксидной смолы ХТ-711 позволяет прогнозировать высокую длительную прочность стеклопластика.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нелюб В.А. Оценка адгезионного взаимодействия между углеродным волокном и эпоксидным связующим // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 7. С. 20–22.
2. Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets A.S., Malysheva G.V. A study of structure formation in a binder depending on the surface microrelief of carbon fiber // Polymer Science — Series D. 2016. 9 (3), pp. 286–289.
3. Солодилов В.И., Корохин Р.А., Горбаткина Ю.А., Куперман А.М. Сравнение энергий разрушения эпоксиполисульфоновых матриц и однонаправленных намоточных композитов на их основе // Механика композитных материалов. 2015. Т. 51. № 2. С. 253–272.
4. Корохин Р.А., Солодилов В.И., Горбаткина Ю.А., Шапагин А.В. Реологические и физико-механические свойства эпокси-полиэфиримидных композиций // Механика композитных материалов. 2015. Т. 51. № 3. С. 445–456.
5. Солодилов В.И., Корохин Р.А., Горбаткина Ю.А., Куперман А.М. Органопластики на основе сложных гибридных матриц, включающих в качестве модификаторов эпоксидных смол полисульфон и углеродные нанотрубки // Химическая физика. 2012. Т. 31. № 6. С. 63–71.
6. Malysheva G.V., Akhmetova E.S., Marycheva A.N. Estimation of glass transition temperature of polysulfone-modified epoxy binders // Glass Physics and Chemistry. 2014. Т. 40. N 5. С. 543–548.
7. Baurova N.I., Zorin V.A., Prikhodko V.M. Description of scenarios of transition of material from an operable to inoperable state using an equation of fold catastrophe theory // Polymer Science — Series D. 2015. 8 (1), pp. 1–5.