

10. Sova V.V., Kusajkin M.I. Vydelenie i ochildka belkov [Isolation and purification of proteins]. Vladivostok: Dal'nevostochnyj un-t. 2006. 42 p.
11. Pasyanskiy A.M. Himiya belka [Protein chemistry]. Moscow: Izd-vo inostrannoj literatury. 2002. 358 p.
11. Medvedeva A.N. Methods of biochemical research. *Questions of medical chemistry*. 2001. No. 4, pp. 426–438. (In Russian).
12. Abramova Z.I. Issledovanie belkov i nukleinovykh kislot [Study of proteins and nucleic acids]. Kazan: Kazanskiy gosudarstvennyj universitet im. V.I. Ul'yanova-Lenina. 2006. 162 p.
14. Semak I.V., Zyryanova T.N., Gubich O.I. Biohimiya belkov [Biochemistry of proteins]. Minsk: BGU. 2007. 67 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ORLOV Vladimir Vladimirovich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: v.v.orlov95@gmail.com

OZHIMKOVA Elena Vladimirovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: eozhimkova@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Orlov V.V., Ozhimkova E.V. Biological nitrogen fixation and its significance for the early stages of the development of flax // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2022. No. 2 (14), pp. 67–74.

УДК 667.64:678.026

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОТКАНИ

В.И. Столяренко, В.И. Ольшанский

УО «Витебский государственный технологический университет» (г. Витебск)

© Столяренко В.И., Ольшанский В.И., 2022

Аннотация. В статье рассмотрены элементы технологии и способы физической модификации полимеров. Разработаны рекомендации по подбору компонентов и отдельных элементов технологического процесса производства композиционного материала на основе стеклоткани с улучшенными механическими характеристиками. Представлены процессы и зависимости влияния свойств отдельных компонентов композита на механические свойства материала в целом. Выполнен анализ методов физической модификации полимеров, отобраны наиболее приемлемые варианты. Проведена их сравнительная характеристика, рассмотрена возможность их применения в

технологическом процессе. Показаны зависимости механических характеристик полимерной эпоксидной матрицы от длительности облучения ее ультрафиолетовым излучением во время полимеризации, в ходе которого экспериментально подтверждена эффективность данного метода. Получены зависимости, отражающие характер и степень влияния длительности ультрафиолетового облучения эпоксидного полимера на его механические свойства.

Ключевые слова: композит, стекловолокно, модификация, эпоксидная смола, полимеризация, свойства, модуль упругости, растяжение, изгиб.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-2-74-85

ВВЕДЕНИЕ

Развитие производственных технологий ставит вопрос разработки конструкционных материалов, превосходящих по своим параметрам традиционно используемые. Одно из перспективных направлений в этой области – разработка полимерных материалов. Полимерные материалы обладают чрезвычайно широкими возможностями ввиду практически безграничной вариабельности состава композиции и методов модификации, а также благодаря широкой номенклатуре самих полимеров и наполнителей. Зачастую только полимеры способны соответствовать возрастающим требованиям современных технических разработок. В области машиностроения и строительства полимерные материалы все активнее конкурируют с такими материалами, как металл, дерево, железобетон. Достоинством полимерных материалов является сочетание требуемого уровня механических свойств с низкой стоимостью материала и высокой производительностью при формировании изделий.

Композиционные конструкционные материалы на основе термореактивных олигомеров находят широкое применение в строительстве и во многих случаях заменяют металлы, а благодаря низкой плотности, высокой коррозионной стойкости и возможности замены нескольких металлических деталей разного назначения одной, выполненной из полимеркомпозита, они незаменимы в различных областях строительной индустрии. В строительных конструкциях широкое применение находят стеклопластики, производство которых на сегодняшний день превысило 2 млн т. Стеклопластиковые материалы на основе термореактивных олигомеров, в том числе эпоксидных, могут эффективно использоваться для изготовления строительных изделий и конструкций в энергетической отрасли [1].

Благодаря малому удельному весу композиционные материалы на основе стеклоткани превосходят сталь по значению удельной прочности: равнопрочная конструкция из стеклопластика оказывается в два раза легче стальной. Низкий удельный вес, низкая теплопроводность (сравнимая с теплопроводностью древесины), высокая диэлектрическая прочность, отсутствие электрохимической коррозии, а также высокая атмосферостойкость и биологическая стойкость обеспечили широкое применение материала [2].

Актуальность совершенствования физико-механических свойств полимеров путем их модификации обусловлена расширением сферы применения данных материалов в строительстве и различных областях техники.

В статье приведен анализ элементов технологии и способов модификации полимеров с целью разработки рекомендаций по повышению механических характеристик полимерного материала, описано экспериментальное исследование зависимости механических характеристик полимерной матрицы от продолжительности облучения УФ (ультрафиолетовым) излучением в момент полимеризации матрицы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для обеспечения высоких механических характеристик рационально применять в качестве матрицы эпоксидный полимер, обладающий приемлемыми характеристиками адгезии к стекловолокну. Оптимальным вариантом может являться смола ЭД-20 ГОСТ 10587-84 – олигомер, состоящий из эпихлоргидрина и дифенилолпропана, в изначальном состоянии представляющий собой вязкую прозрачную массу с янтарным оттенком, которая при воздействии отвердителя переходит в твердое, нерастворимое, неплавкое состояние.

Стандартными отвердителями для этой смолы являются полиэтиленполиаминовый (ПЭПА) отвердитель ТУ 6-02-594-85, триэтилентетрамин (ТЭТА) ТУ 6-02-1099-83. Этал-45 ТУ 2257-045-18826195-01 – это нетоксичный отвердитель аминного типа, который не имеет неприятного запаха и не вызывает аллергических реакций, по свойствам близок к ПЭПА, но смола после отверждения более пластична. Данный отвердитель более технологичен, не образует повышенное число поперечных сшивок полимолекулы, благодаря чему обеспечивается лучшая эластичность матрицы, а процесс отверждения идет несколько быстрее, чем у ТЭТА.

Стекловолокно при изготовлении стеклопластиков применяется в виде ровницы, пряжей, нитей, тканей, матов. При текстильной обработке снижается коэффициент использования прочности единичного стеклянного волокна. Это объясняется разрушением части волокон, возникновением поверхностных трещин, неоднородностью работы волокон при закручивании, усложнением пропитки связующим [3].

По условию работы волокон на растяжение-сжатие наиболее подходящими материалами представляются ровница с диаметром волокна от 5 до 11 мкм, расположенная под углом 45–90°, сатин 8/3 и ровистан 30А.

Специфика использования композитов в строительстве предполагает контакт с влажной средой, и здесь оптимальным вариантом является бесщелочное, алюмоборосиликатное стекло марки «Е» [4].

В целом свойства стеклопластикового композита зависят от прочности и деформационных свойств матрицы, состава и ориентации наполнителя и прочности адгезионного слоя. Адгезионное взаимодействие происходит по границе контакта наполнителя и матрицы, образуя прилегающий к поверхности раздела переходный слой. В переходном слое образуется связь между матрицей и наполнителем, влияющая на условие торможения трещин в материале. Если прочность переходного слоя меньше прочности волокон наполнителя, то трещина будет проходить по поверхности раздела, а на изломе будет заметно вытягивание волокон из матрицы, следовательно, чем больше адгезия, тем выше механические свойства. При превышении верхнего предела прочности адгезионного слоя, определяемого прочностью наполнителя, матрица теряет свои свойства упругого связующего [4].

При разработке композиционного многокомпонентного материала необходимо стремиться максимально использовать свойство каждого элемента, чтобы обеспечить

однородность их деформации при приложении нагрузки, и стараться передать максимум нагрузки несущим армирующим волокнам [5].

В работе [6] описан комплекс требований, связывающих свойства матрицы и волокон: при оптимальном содержании армирующих волокон 70 % от объема материала их прочностные свойства реализуются на 90 %.

Требования выражаются системой неравенств:

$$\frac{E_{\text{матрицы}}}{E_{\text{стекловолокна}}} > 0,064,$$

где E – модуль упругости, МПа;

$$\frac{\sigma_{\text{матрицы}}}{\sigma_{\text{стекловолокна}}} > 0,06,$$

где σ – прочность при растяжении, МПа;

$$\frac{\varepsilon_{\text{матрицы}}}{\varepsilon_{\text{стекловолокна}}} > 1,5,$$

где ε – относительная деформация;

$$\frac{E_{\text{матрицы}}}{E_{\text{стекловолокна}}} > 0,06 ;$$

$$\frac{\tau_{\text{адгезии}}}{\sigma_{\text{стекловолокна}}} > 0,015,$$

где τ – прочность при сдвиге, МПа;

σ – прочность при растяжении, МПа;

$$\frac{\varepsilon_{\text{матрицы}}}{\varepsilon_{\text{стекловолокна}}} > 1,7 ;$$

$$\frac{\tau_{\text{матрицы}}}{\tau_{\text{стекловолокна}}} \geq 1.$$

Эпоксидная матрица требует доработки, снижающей хрупкость и повышающей упругие свойства материала. При этом необходимо стремиться избежать удорожания материала, возникающего при химических методах модификации полимеров. Частичного улучшения механических свойств можно добиться применением отвердителя «Этал 45», повышающего пластичность матрицы. Дальнейшее повышение пластичности возможно при применении физических методов модификации полимера. В отличие от химических физические методы модификации экологичны, управляемы, легко поддаются автоматизации.

Физическая модификация делится на термическую, облучение, вакуумно-компрессионное воздействие, периодическую деформацию, воздействие магнитным полем [7].

На основании данных работы [7] проведен анализ наиболее приемлемых методов физической модификации полимеров (табл. 1).

В результате анализа методов физической модификации одним из наиболее перспективных видится метод воздействия УФ-излучения на матрицу полимерного композита. Достоинства и особенности воздействия данного метода: метод при

минимальных энергетических затратах способен легко встраиваться в техпроцесс производства композита, при этом УФ-излучение способствует образованию новых цепочек на начальном этапе полимеризации, уменьшается количество поперечных сшивок полимолекулы, структура измельчается и уплотняется, и, как следствие, повышаются прочность, жесткость и упругость материала. Кроме того, на начальном этапе к материалу подводится дополнительная энергия, вызывающая ускорение полимеризации матрицы.

Таблица 1

Анализ методов физической модификации полимеров

Способ модификации	Характер воздействия на полимер	Влияние на свойства полимера	Возможность применения в техпроцессе
Давление, холодная прокатка	Влияет на структурную упорядоченность	Повышает температуру кристаллизации, повышает прочностные характеристики на 10 %	Легко вписывается в техпроцесс, положительно влияет на заданные свойства
Ультрафиолетовое излучение. Время воздействия 15–30 мин, длина волны 200–350 нм, мощность излучателя 1,5 Вт./см ²	Ускоряет отверждение, снижает энергию активации отверждения, повышает вероятность образования линейных цепей на начальной стадии с последующим формированием из них сетчатой структуры	Повышает прочностные характеристики на 30 %, снижает водопоглощение материала, увеличивает адгезию	Простота оборудования, низкие энергозатраты, не усложняет техпроцесс. Требуется защита персонала
Ультразвуковая обработка А. Очистка нити от замасливателя 5 мин, частота 110 Гц. Б. Холодная прокатка + + ультразвук 20 КГц. В. Обработка матрицы 2–7 Вт./см ² . Г. Обработка композита при застывании	А. Скорость очистки увеличивается в 30 раз. Б. Влияет на глубину воздействия. В. Снижает вязкость смолы. Г. Повышает равномерность распределения компонентов	А. Повреждает волокна. Б. Повышается упругость в 1,4 раза, прочность – на 12 %. В. Время пропитки уменьшается в 1,6 раза. Г. Повышает прочностные свойства	Имеется значительный положительный эффект, требует защиты персонала, дополнительное оборудование
Вибрация + + УФ-излучение	Перемешивание слоев повышает эффективность воздействия	Повышает на 40 % прочность и упругость, снижает водопоглощение материала, увеличивает адгезию	Заметный эффект в сочетании с технологичностью, требует защиты персонала

Окончание таблицы

Способ модификации	Характер воздействия на полимер	Влияние на свойства полимера	Возможность применения в техпроцессе
Воздействие электромагнитного поля, время воздействия 15 мин, напряженность магнитного поля 636 кА/м: А. Постоянного. Б. Переменного	А. Растет упорядоченность надмолекулярной структуры. Б. Понижает температуру отверждения	Повышение прочностных характеристик на 30–90 %; постоянное поле вызывает анизотропию свойств	Экономичность, простота управления, значительный положительный эффект. Требует средств защиты персонала
Механотермический метод: А. Обкатка стальным роликом при $t = 65–90\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление ролика 600–750 МПа. Б. Вытяжка при температуре выше точки кристаллизации на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$	А. Формирует изделие с эластичным ядром и жестким внешним слоем. Б. Меняет структуру строения материала	Прочностные свойства поверхностного слоя в 10 раз превосходят исходный образец. Прочность повышается в 4–5 раз по всей толщине образца	Возможно применение метода на стадии протягивания полосы от экструдера до прессы, значительно повышает механические свойства композита

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований способом заливки в форму изготовлены образцы из эпоксидного полимера ЭД-20 ГОСТ 10587-84.

Размеры образцов:

для испытания на изгиб по ГОСТ 4648-71: длина 80 мм, ширина $(25 \pm 0,50)$ мм, толщина $(2,00 \pm 0,20)$ мм;

для испытания на разрыв по ГОСТ 11262-80: длина 250 мм, расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце, составляет (170 ± 5) мм; расчетная длина (50 ± 1) мм, ширина $(25 \pm 0,50)$ мм, толщина $(2,00 \pm 0,20)$ мм.

Толщина образца измерена в точках, находящихся на расстоянии ± 2 мм от центра образца, по ГОСТ 6507 с использованием микрометра, обеспечивающего измерение с погрешностью $\pm 0,01$ мм. Ширина образца измерена в соответствии со стандартом ИСО 16012 «Пластмассы. Определение линейных размеров испытательных образцов» с использованием микрометра, обеспечивающего измерение с погрешностью $\pm 0,02$ мм. Условия кондиционирования и испытания образцов в стандартной атмосфере 23/50, температура воздуха $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 50 % в соответствии с ГОСТ 12423-2013.

Продолжительность воздействия излучения изменялась дискретно: 0; 7,5; 15; 30; 45 мин с каждым новым образцом. Измерение выдержки производилось с помощью лабораторного таймера ТЛ-301 с индикацией времени в диапазоне до 99 мин 59 с. В качестве источника излучения применялась лампа T8 UVC G13 15 Вт, установленная на расстоянии 100 мм от поверхности материала, длина волны излучения 254 нм. В каждом опыте применялась пятикратная повторяемость.

Механические свойства образцов изучены при проведении испытания в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 9550-81, система измерения нагрузки – в соответствии с требованиями для группы машин 0-У по ГОСТ 28840 (предел допускаемой погрешности $\pm 0,5\%$ измеряемой нагрузки). Для проведения испытаний была использована разрывная лабораторная машина WDW-20E, соответствующая требованиям ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб». Общие технические характеристики машины приведены в табл. 2.

Таблица 2
Технические характеристики испытательной машины WDW-20E

Характеристика	Значение
Максимальная нагрузка	20 кН
Точность измерения приложенной нагрузки	$\pm 0,5\%$
Точность измерения деформации образца	$\pm 0,5\%$
Разрешение перемещения	0,001 мм
Точность измерения перемещения	$\pm 1\%$
Диапазон скоростей нагружения	0,005–500 мм/мин
Максимальное перемещение траверсы при растяжении и сжатии	800 мм
Ширина пространства для испытаний	370 мм

Скорость расхождения захватов при растяжении составляет $(1,0 \pm 0,5)\%$ /мин, при изгибе 3 мм/мин, расстояние между опорами при изгибе 60 мм.

Модуль упругости при растяжении определялся как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительного удлинения. Модуль упругости при растяжении (E_p) в МПа вычислялся по формуле

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_0}{A_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)},$$

где F_2 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3 %, Н;

F_1 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,1 %, Н;

l_0 – расчетная длина образца, мм;

A_0 – площадь начального поперечного сечения образца, мм²;

Δl_2 – удлинение, мм, соответствующее нагрузке F_2 ;

Δl_1 – удлинение, мм, соответствующее нагрузке F_1 .

Модуль упругости при изгибе определялся как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительной деформации (по трехточечной схеме нагружения).

Относительная деформация крайних волокон рассчитывалась по формуле

$$\zeta = \frac{6zh}{L_v^2},$$

где z – значение прогиба, мм;

h – толщина образца, мм;

L_v – расстояние между опорами, мм.

Скорость деформации при растяжении определялась как отношение скорости перемещения подвижного элемента испытательной машины (v) к длине образца между кромками зажимов. При изгибе скорость деформации рассчитывалась по формуле

$$v = \frac{u \cdot L_v^2}{6h},$$

где u – скорость деформации крайних волокон образца, равная $0,01 \text{ мин}^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости изменения механических свойств матрицы от времени облучения при полимеризации (рис. 1–4).

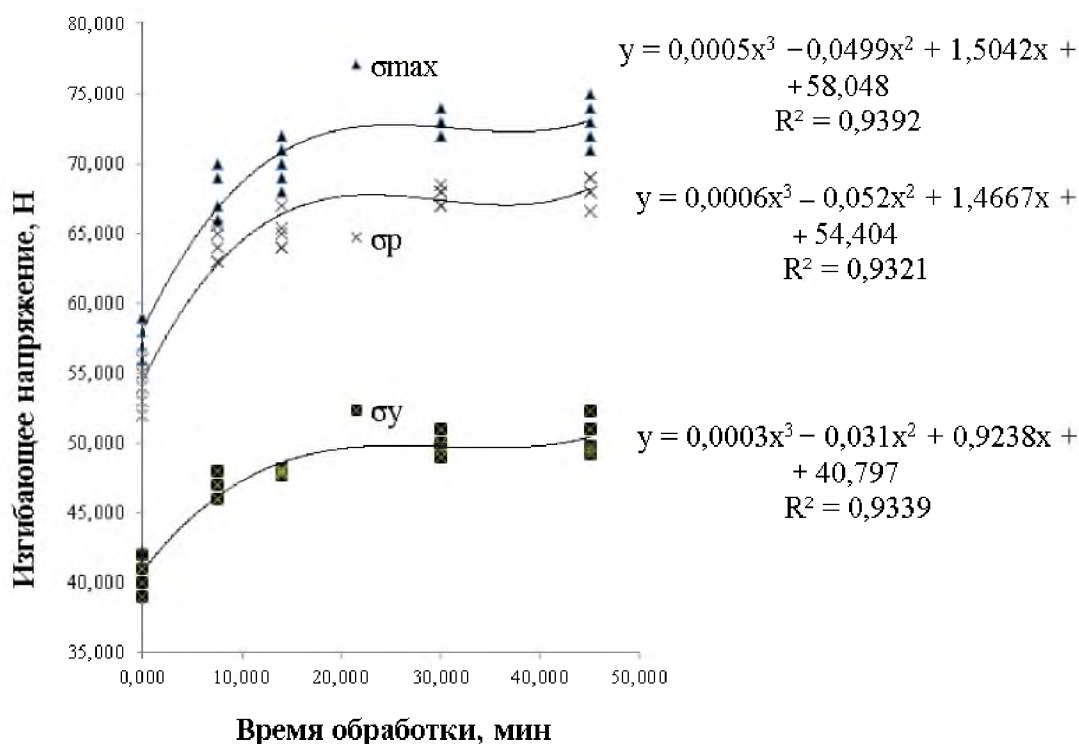


Рис. 1. Изменение механических параметров при испытании эпоксидного полимера на изгиб в зависимости от продолжительности воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации: σ_{max} – изгибающее напряжение при максимальной нагрузке; σ_p – изгибающее напряжение при разрушении; σ_y – максимальное изгибающее напряжение упругой деформации образца

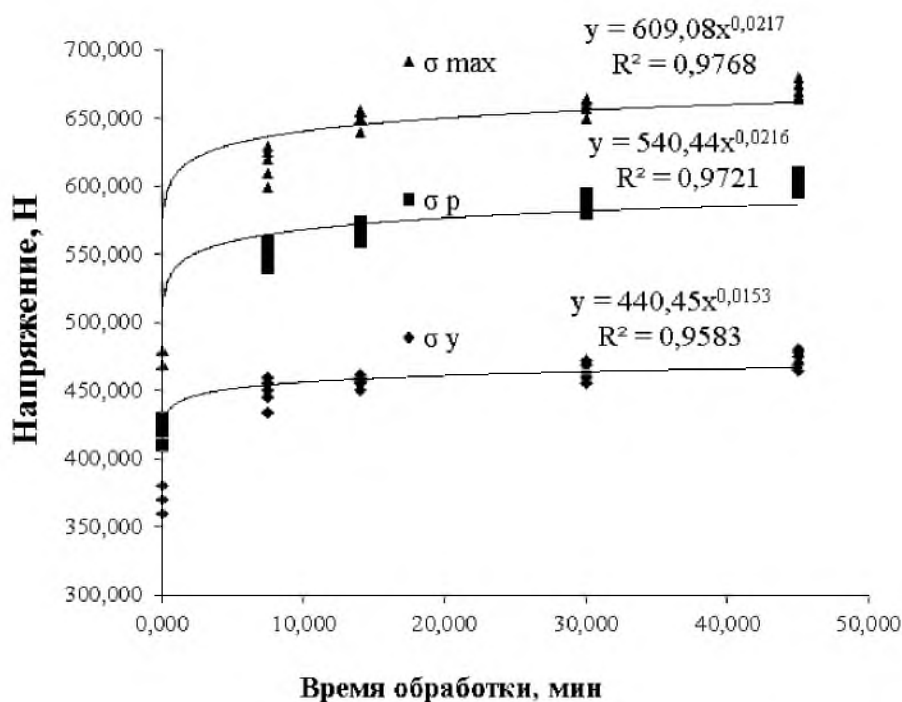


Рис. 2. Изменение механических параметров эпоксидного полимера при испытании на растяжение в зависимости от продолжительности воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации: σ_{max} – напряжение растяжения при максимальной нагрузке; σ_p – напряжение растяжения при разрушении; σ_y – максимальное напряжение растяжения упругой деформации образца

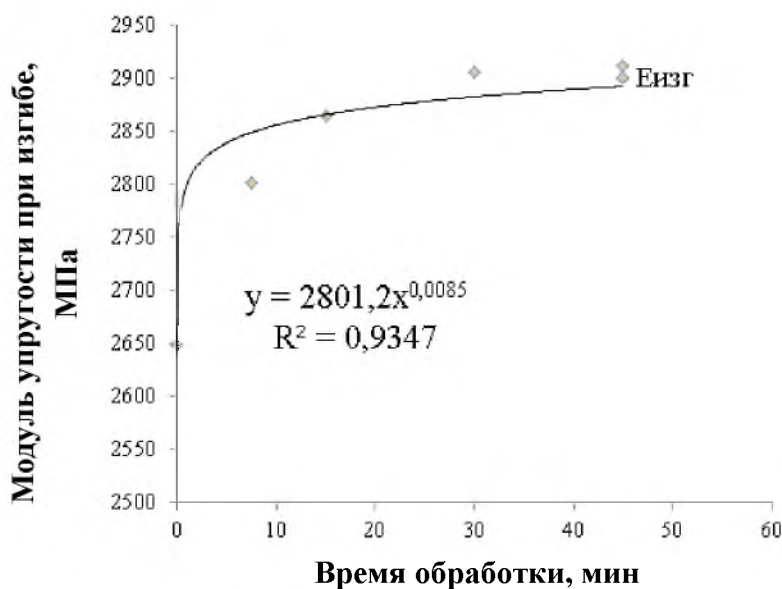


Рис. 3. Зависимость изменения модуля упругости при изгибе от продолжительности воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации

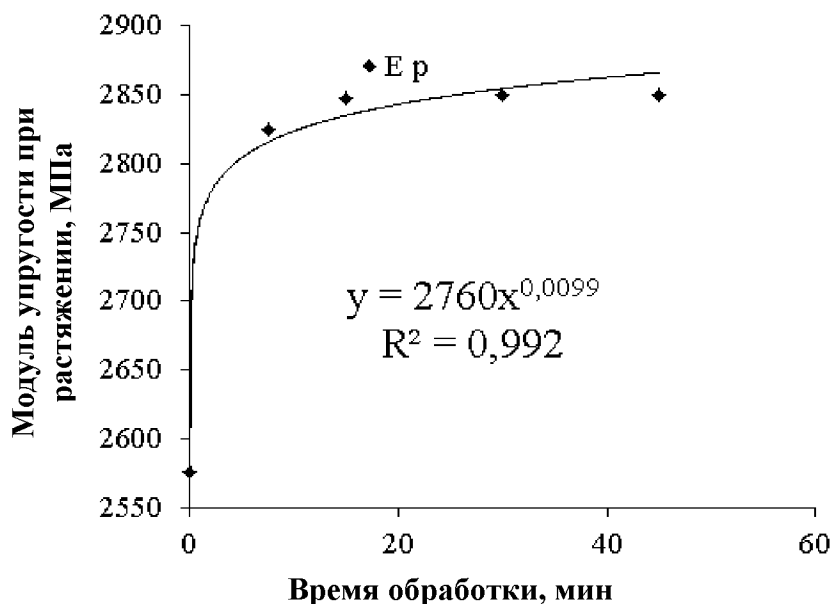


Рис. 4. Зависимость изменения модуля упругости при растяжении от продолжительности воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации

Согласно представленным на рис. 1–4 графикам, механические характеристики облученных образцов (предел напряжения при максимальной нагрузке, предел напряжения при разрушении и предел напряжения при упругой деформации) повысились в среднем на 15–20 %.

Расчитанный на основании проведенных измерений средний модуль упругости при изгибе и растяжении выявил аналогичные тенденции зависимости показателей упругости от времени облучения образцов. Данные зависимости с достоверностью не ниже 93 % описываются приведенными на графиках математическими моделями.

Анализируя графики, можно прийти к выводу, что облучение наиболее эффективно в течение первых 8–10 мин обработки. Дальнейшее увеличение времени облучения имеет заметно меньшую эффективность воздействия. На графике это выражается снижением скорости изменения параметров упругости образцов (график переходит в пологую траекторию). Это вполне сопоставимо с теоретическими предпосылками, объясняющими воздействие УФ-излучения на процесс полимеризации эпоксидного олигомера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проанализированы элементы технологии и способы физической модификации полимеров, способные обеспечить повышенные механические характеристики материала; представлено экспериментальное исследование зависимости механических характеристик полимерной матрицы от времени воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации материала с целью повышения модуля упругости при изгибе и растяжении. В ходе эксперимента получены зависимости механических характеристик эпоксидной матрицы от времени облучения при полимеризации материала. В результате облучения эпоксидной смолы ЭД-20 при полимеризации механические характеристики повысились на 15–20 %. Наибольший эффект достигается при продолжительности облучения, составляющей 8–10 мин. Результаты эксперимента подтверждают, что данный

метод физической модификации полимерной матрицы обладает достаточно высокой эффективностью и может применяться в технологическом процессе производства многокомпонентных полимерных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ястребинская А.В. Разработка и применение композиционного материала на основе эпоксидиановой смолы для строительных конструкций и теплоэнергетики // *Современные наукоемкие технологии*. 2004. № 2. С. 173–174.
2. Бондалетова Л.И., Бондалепов В.Г. Полимерные композиционные материалы. Томск: Томский политехнический университет. 2013. 111 с.
3. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: НОТ. 2008. 820 с.
4. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. М.: Научный мир. 2009. 384 с.
5. Каримова Л.К., Ахметшина А.И., Дебердеев Т.Р. Производство изделий из стеклопластиков. Материалы, технологии и методы испытаний. Казань: Школа. 2019. 106 с.
6. Мельников Д.А., Громова А.А., Раскутин А.Е., Курносов А.О. Теоретический расчет и экспериментальное определение модуля упругости и прочности стеклопластика ВПС-53/120 // *Труды ВИАМ*. 2017. № 1 (49). С. 64–75.
7. Кестельман В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. М.: Химия. 1980. 224 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СТОЛЯРЕНКО Владимир Ильич – аспирант кафедры «Теплоэнергетика», УО «Витебский государственный технологический университет», 210035, г. Витебск, Московский пр., д. 72. E-mail: stoljarenkov@mail.ru

ОЛЬШАНСКИЙ Валерий Иосифович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», УО «Витебский государственный технологический университет», 210035, г. Витебск, Московский пр., д. 72.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Столяренко В.И., Ольшанский В.И. Физические методы модификации структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе стеклоткани // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 2 (14). С. 74–85.

PHYSICAL METHODS FOR MODIFYING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON GLASS FABRIC

V.I. Stolyarenko, V.I. Olshansky
Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Belarus)

Abstract. The article discusses the elements of technology and methods of physical modification of polymers. Recommendations have been developed for the selection of components and individual elements of the technological process for the production of a

composite material based on glass fabric with improved mechanical characteristics. The processes and dependences of the influence of the properties of individual components of the composite on the mechanical properties of the material as a whole are presented. The analysis of methods of physical modification of polymers was carried out, the most acceptable options were selected. Their comparative characteristics are carried out, the possibility of their application in the technological process is considered. The dependences of the mechanical characteristics of the polymer epoxy matrix on the duration of its irradiation with ultraviolet radiation during polymerization are shown, during which the effectiveness of this method is experimentally confirmed. Dependences reflecting the nature and degree of influence of the duration of ultraviolet irradiation of an epoxy polymer on its mechanical properties are obtained.

Keywords: composite, glass fiber, modification, epoxy resin, polymerization, properties, elastic modulus, stretch, bending.

REFERENCES

1. Yastrebinskaya A.V. Development and application of a composite material based on epoxy resin for building structures and thermal power engineering. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2004. No. 2, pp. 173–174. (In Russian).
2. Bondaletova L.I., Bondalepov V.G. Polimernye kompozicionnye materialy [Polymer composite materials]. Tomsk: Tomsk polytechnic university. 2013. 111 p.
3. Mikhailin Yu.A. Konstrukcionnye polimernye kompozicionnye materialy [Structural polymer composite materials]. SPb: HOT. 2008. 820 p.
4. Askadsky A.A., Khokhlov A.R. Vvedenie v fiziko-himiyu polimerov [Introduction to the physical chemistry of polymers]. Moscow: Nauchnyj mir. 2009. 384 p.
5. Karimova L.K., Akhmetshina A.I., Deberdeev T.R. Proizvodstvo izdelij iz stekloplastikov. Materialy, tekhnologii i metody ispytaniy [Production of fiberglass products, materials, technologies and test methods]. Kazan: Shkola. 2019. 106 p.
6. Melnikov D.A., Gromova A.A., Raskutin A.E., Kurnosov A.O. Theoretical calculation and experimental determination of the modulus of elasticity and strength of fiberglass VPS-53/120. *Trudy VIAM*. 2017. No. 1 (49), pp. 64–75. (In Russian).
7. Kestelman V.N. Fizicheskie metody modifikacii polimernyh materialov [Physical methods for the modification of polymer materials]. Moscow: Himiya. 1980. 224 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

STOLYARENKO Vladimir Il'ich – Post-graduate Student of the Department «Heat Power Engineering», Vitebsk State Technological University, 72, Moskovsky Prospekt, Vitebsk, 210035, Belarus. E-mail: stoljarenkov@mail.ru

OLSHANSKIY Valery Iosifovich – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of «Heat Power Engineering», Vitebsk State Technological University, 72, Moskovsky Prospekt, Vitebsk, 210035, Belarus.

CITATION FOR AN ARTICLE

Stolyarenko V.I., Olshansky V.I. Physical methods for modifying the structure and properties of polymer composite materials based on glass fabric // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 2 (14), pp. 74–85.