

АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ГЕЛЕНКОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СТЕКЛОТКАНИ

ANALYSIS OF TECHNOLOGY ELEMENTS FOR PRODUCING SHANK FROM A COMPOSITE FIBERGLASS MATERIAL

УДК 685.34.073.39

В.И. Столяренко*, В.И. Ольшанский

Витебский государственный технологический университет

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2021-2-81-89>

V. Stolyarenko*, V. Alshanski

Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

ГЕЛЕНОК, КОМПОЗИТ, СТЕКЛОВОЛОКНО, ОБУВЬ, ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГЕЛЕНКОВ, МЕТОДЫ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ, ЭПОКСИДНЫЙ СТЕКЛОПЛАСТИК

Предмет исследования: технологический процесс производства геленка из многокомпонентного композиционного материала.

Цель: разработка технологии производства геленка из многокомпонентных материалов на основе стекловолокна.

В работе использовались опытно-аналитические методы исследования. В результате выбраны компоненты и разработаны элементы оригинального технологического процесса производства стелечного узла, содержащего геленок из многокомпонентных композиционных материалов на основе стеклоткани. Произведен анализ возможности физической модификации компонентов с целью повышения их механических свойств. Экспериментально подтверждена эффективность модификации композиционного материала УФ-излучением с целью повышения механических свойств. Область применения процесса – обувная промышленность.

ABSTRACT

SHANK, COMPOSITE, FIBERGLASS, FOOTWEAR, SHANK PRODUCTION TECHNOLOGY, PHYSICAL MODIFICATION METHODS, EPOXY FIBERGLASS

Subject of research: technological process of manufacturing a shank from a multicomponent composite material.

Objective: development of technology for the production of a shank from multicomponent materials based on fiberglass.

An original technological process for manufacturing a shank consisting of a multicomponent composite material, epoxy binder and fiberglass filler has been developed. The requirements for shanks and their manufacturing technology have been taken into account. The choice of material components and elements of the technological process has been made. Variants of physical modification of material components are selected. The influence of ultraviolet radiation on the properties of the binder has been investigated. The efficiency of using ultraviolet radiation at the initial stage of polymerization has been proven. Scientific novelty lies in the development of an original technological process, taking into account the advantages of the local industry and the requirements for the production of the liner. Shoe manufacturers can use this technological process.

* E-mail: stoljarenkov@mail.ru (V. Stolyarenko)

Среди массы факторов, характеризующих эксплуатационные свойства обуви, одним из основных является жесткость пяточно-геленочного отдела. Жесткость формируется с помощью геленка, стельки и полустельки. Ключевую функцию укрепления несет геленок. Геленок, выполняя функцию поддержки подсводной части стопы, снижает нагрузку при ходьбе, обеспечивает профилактику возникновения плоскостопия, защищает обувь от переламывания при снятии ее с колодки в процессе производства [1].

Потребность в геленках на отечественном рынке составляет до 5 миллионов пар в год. Отечественные производители обуви в большинстве используют стальные геленки. Основным поставщиком стальных геленков на белорусский рынок является ООО «Киевский фурнитурный завод». Из отечественных производителей геленков на рынке присутствует фирма ООО «Фурнитур-ВУ», специализирующаяся на производстве стальных и пластмассовых геленков. Стальные геленки получили широкое распространение вследствие хороших механических свойств и простоты изготовления. Несмотря на данные преимущества стальные геленки не лишены и ряда недостатков, особо существенными из них являются: большой удельный вес и склонность к коррозии, приводящая к разрушению геленка.

Альтернативой металла может служить стеклопластик. Стеклопластики располагают рядом положительных свойств: низкий удельный вес и теплопроводность, высокая коррозионная стойкость, диэлектрическая прочность, отсутствие электрохимической коррозии. Механические характеристики стеклокомпозитов в два раза выше, чем у пластика, используемого в качестве альтернативы металлическим геленкам [2].

Анализ производства геленков позволяет сделать вывод о том, что стеклопластиковые геленки в промышленных масштабах в республике не производятся, а технология изготовления проработана недостаточно.

Целью работы является разработка технологического процесса изготовления геленков из композиционного материала на основе стеклопластика. Основные задачи, решаемые при разработке техпроцесса: решение вопроса длительности полимеризации композиционных материалов на основе термореактивной смолы,

сложность технологии производства, большая доля ручного труда, потребность модификации материала с целью повышения механических свойств, решение задачи избежания усложнения техпроцесса и удорожания материала, возникающего при химических методах модификации.

Для чего необходимо: установить комплекс требований к данной детали обуви, проанализировать имеющиеся технологии получения композиционных материалов и адаптировать их к условиям серийного производства геленков, произвести подбор компонентов будущего материала, разработать структуру материала и технологию его получения, проанализировать возможность модификации материала.

В соответствии с международным стандартом CEN ISO/TR 20883:2007 устанавливаются требования к эксплуатационным характеристикам деталей обуви геленка (не в готовой обуви). Усталостная прочность – 3000–60000 циклов, жесткость в продольном направлении – от 400 до 1600 $\text{кН} \cdot \text{мм}^2$, в зависимости от величины каблука.

Остаточная деформация не должна превышать 3 мм для обуви на высоком каблуке, 1,5 мм – для обуви на среднем каблуке и 1 мм – для обуви на низком каблуке [3].

Физические требования: низкий удельный вес, низкая электропроводность, теплопроводность, магнитные свойства и склонность к коррозии.

Технологические требования: материал должен беспрепятственно принимать заданную в процессе производства форму, обеспечить удобство крепления к стельке и возможность автоматизации процесса.

Учитывая специфику отечественной сырьевой базы, планируется изготовление композиционного материала на основе стекловолокна, производимого открытым акционерным обществом «Полоцк-Стекловолокно». Выбор стекловолокна обусловлен его высокой механической прочностью. Исходя из условий работы стелечного узла, планируется использование бесщелочного, алюмоборосиликатного стекла марки «Е» [4].

Стекловолокно при изготовлении стеклопластиков применяется в виде ровницы, прядей,

нитей, тканей, матов. При текстильной обработке снижается коэффициент использования прочности единичного стеклянного волокна. Это объясняется разрушением части волокон, возникновением поверхностных трещин и неоднородностью работы волокон при закручивании, усложнением пропитки связующим [5].

С учетом вышесказанного из номенклатуры продукции ОАО «Полоцк-стекловолокно» наиболее подходящим материалом представляется ровница с диаметром волокна от 5 до 11 *мкм*, сатин 8/3, или ровистан 30А.

Для более полного использования высоких прочностных характеристик материала наиболее целесообразна трёхслойная конструкция. Во внешних слоях волокна располагаются в два перекрещивающихся слоя, размещенных под углом тридцать градусов к продольной оси, для избежания расслаивания материала вдоль волокон и противодействия извивающей силе. Возможно использование в качестве наполнителя стеклоткани типа сатин либо ровистан. Центральный слой имеет в качестве наполнителя хаотично расположенные короткие волокна. Его функция – образование связи между наружными слоями. Плотность наполнителя во внешних слоях 65–70 %. Внутренний слой имеет плотность наполнителя не более 55–60 %. Толщина слоев проектируется с учетом назначения геленка. Толщина геленка в целом определяется конструкцией стелечного узла. С учетом того, что стержневая конструкция геленка из стеклопластика не всегда способна гарантировать заданные механические характеристики, необходимо использовать геленок пластинчатой конструкции.

Для производства композиционных материалов из стеклопластика применяется ряд технологических методов: контактное формование в открытых формах, намотка, метод инъекции в закрытую форму (RTM – RESIN TRANSFER Moulding), метод вакуумной инфузии (LIGHT RTM), пултрузии, автоклавного формования, аддитивного производства, прессование [6].

Контактное формование в открытой форме. На практике применяется ручное формование и метод напыления. Оба метода отличаются невысокой производительностью, значительными затратами ручного труда, зависимостью качества от квалификации персонала и сравнитель-

но низкими механическими свойствами получаемого материала.

Метод намотки выполняется мокрым способом – пропиткой наполнителя перед намоткой, и сухим – намоткой препрегов. Применяется для производства деталей тел вращения.

Метод инъекции. Стеклоткань предварительно раскраивается и раскладывается в закрытую форму. Затем происходит впрыскивание связующего до полной пропитки наполнителя. Отверждение происходит здесь же.

Вакуумная инфузия. Смола вводится в наполнитель с помощью вакуума, создаваемого в специальном мешке, где и происходит полимеризация материала.

Метод автоклавного формования. Формование и отверждение препрегов при повышенном давлении и температуре в специальном устройстве – автоклаве.

Все эти методы используются для производства крупногабаритных изделий и характеризуются высокой долей ручного труда.

Пултрузия – метод получения стеклопластиков при протягивании пропитанного волокна через нагретое формообразующее устройство. По статистике более половины стеклопластика промышленного производства получают данным методом. Полученный материал характеризуется высокой механической прочностью, хорошими физическими свойствами, стойкостью к воздействию влажности и микроорганизмов.

ООО СКБ «Мысль» выдвинуло ряд предложений по дополнениям к методам пултрузии стеклопластика. Например: экструзионно-прессовой метод, метод УФ-пултрузии, термоусадочная пултрузия, полироллформинг, прессовое, спиральное и объёмное профилирование [7].

Разработанная для изготовления геленков технология включает: экструзию внутреннего слоя с разнонаправленным наполнителем, создание трехслойной конструкции с внешними однонаправленными слоями, частичную полимеризацию в фильере (пултрузия), покрытие термоусадочной пленкой, обжатие, вытяжка, горячее прессование и отделение геленка от полосы. Термоусадочная оболочка сохранит структуру материала при застывании, исключив расслаивание, и гарантирует хорошую адгезию при сборке стелечного узла с использовани-

ем термокляея. Процесс сборки стелечного узла осуществляется горячим прессованием и совмещен с формообразованием стеклопластикового геленка, в частности в придании ему заданного изгиба. Окончательная полимеризация происходит в складских условиях, не замедляя процесс производства, это снимает вопрос низкой производительности, вызванной длительностью полимеризации композиционных материалов. Техпроцесс содержит методы механотермической модификации материала, а также позволяет добавлять на любом этапе различные методы физической модификации материала, может быть полностью автоматизирован, что исключает ручной труд и сокращает расходы на производство. Применение многопоточных фильер, формирующих одновременно несколько полос, позволяет обеспечить требуемую производительность производства.

Механические характеристики стеклопластикового композита зависят от прочности адгезионного слоя. Адгезионное взаимодействие происходит по границе контакта наполнителя и матрицы, образуя прилегающий к поверхности раздела переходной 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, на изломе будет заметна вытяжка волокон наполнителя из матрицы. Следовательно, для получения заданных механических характеристик требуется обеспечить прочность адгезионного слоя [4].

Эпоксидная смола обладает одним из наилучших показателей адгезии к стекловолокну. Критерием выбора марки смолы является: приемлемые механические характеристики, доступность и стоимость. Этим критериям удовлетворяет смола ЭД-20 ГОСТ 10587-84 олигомер, состоящий из эпихлоргидрина и дифенилолпропана, переходящий под воздействием отвердителя в твердое, неплавкое, нерастворимое состояние.

Стандартными отвердителями являются: ПЭПА (полиэтиленполиаминовый отвердитель, ТУ 6-02-594-85), ТЭТА (триэтилентетрамин, ТУ 6-02-1099-83), Этал-45 (нетоксичный отвердитель аминного типа, ТУ 2257-045-18826195-01),

температура отверждения 20–24 °С, не вызывает аллергических реакций, не имеет неприятного запаха, по свойствам близок к ПЭПА, но смола после отверждения более пластична.

Матрица требует доработки, повышающей механические характеристики материала. Модификация может проводиться физическими и химическими методами. Химические методы реализованы путем подбора подходящего отвердителя, их дальнейшее развитие повышает себестоимость материала, усложняет технологию производства. Методы физической модификации весьма разнообразны. Сравнительным анализом подобраны наиболее приемлемые методы, введение которых в техпроцесс приведет к заметному положительному эффекту (таблица 1).

Наиболее подходящим видится метод УФ-облучения. Данный метод имеет минимальные энергетические и финансовые затраты, легко встраивается в технологический процесс. УФ-излучение способствует образованию новых цепочек на начальном этапе полимеризации, подводится дополнительная энергия, вызывающая ускорение полимеризации, снижается количество поперечных сшивок, структура измельчается и уплотняется, что приводит к повышению прочности, жесткости и упругости полимера.

В целях проверки эффективности данного воздействия проведено экспериментальное исследование влияния продолжительности УФ-излучения при полимеризации на механические свойства эпоксидной смолы ЭД-20. Опыт проводился при значении времени выдержки: 0; 7,5; 15; 30; 45 (минут). Для облучения применялся источник УФ-излучения – лампа Т8 UVC G13 15 Вт, длина волны излучения – 254 нм, на расстоянии 100 мм от поверхности смолы. Толщина отливки – 2 мм. Температура окружающей среды – 24 °С. Для статистической достоверности на каждом этапе изготавливалось по пять образцов.

Механические свойства материала исследовались на изгиб и растяжение в соответствии с методикой, предложенной ГОСТ 9550-81.

Испытания проводились на разрывной испытательной машине WDW-20E. Технические характеристики испытательной машины: максимальная нагрузка – 20 кН, точность нагрузки – ±0,5 %, точность деформации – ±0,5 %, разрешение перемещения – 0,001 мм, точность измере-

Таблица 1 – Анализ наиболее приемлемых 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 на 10 % прочностные характеристики	Легко вписывается в техпроцесс на стадии формирования стелечного узла, положительно влияет на заданные свойства
УФ-излучение. Время воздействия – 15–30 минут, 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, требует защиты персонала
Ультразвуковая обработка: а) очистка нити от замасливателя 5 минут, 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 раз; г) повышает прочностные свойства	Требует дополнительное оборудование, имеется значительный положительный эффект, требует защиты персонала
Вибрация + УФ-излучение	Перемешивание слоев повышает эффективность воздействия	Повышает на 40 % прочность и упругость, снижает водопоглощение материала, увеличивает адгезию	Заметный положительный эффект в сочетании с технологичностью, требует защиты персонала
Воздействие электромагнитного поля, время воздействия 15 минут, 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 °С	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 пресса, значительно повышает механические свойства композита

Таблица составлена с использованием данных из литературы [8]

ния перемещения – ± 1 %, диапазон скоростей нагружения – 0,005–500 *мм/мин*, максимальное перемещение траверсы при растяжении и сжатии – 800 *мм*, ширина пространства для испытаний – 370 *мм*.

Параметры проведения испытания: скорость расхождения захватов при растяжении – $(1,0 \pm 0,5)$ % в минуту, при изгибе – 3 *мм/мин*, расстояние между опорами при изгибе – 60 *мм*, температура в помещении – 28 °С. Образцы для испытания на изгиб – по ГОСТ 4648-71, для испытания на разрыв – по ГОСТ 11262-80. Сущность метода заключается в определении модуля упругости при растяжении как отношения приращения напряжения к соответствующему приращению относительного удлинения. По диаграмме определяются значения нагрузки, соответствующие величинам относительного удлинения 0,1 и 0,3 %.

Модуль упругости при растяжении (E_p) в *МПа* вычисляется по формуле:

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_0}{A_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)} \quad (1)$$

где F_2 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3 %, F_1 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,1 %, H ; l_1 – расчетная длина образца, *мм*; A_0 – площадь начального поперечного сечения образца, *мм*; Δl_2 – удлинение, соответствующее нагрузке F_2 , *мм*; Δl_1 – удлинение, соответствующее нагрузке F_1 , *мм*.

Модуль упругости при изгибе определялся как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительной деформации, по трехточечной схеме нагружения. Образцы нагружались при скорости расхождения наконечника и опор, обеспечивающей деформацию образца $(1,0 \pm 0,5)$ % в минуту.

Относительная деформация крайних волокон (ζ) вычисляется по формуле:

$$\zeta = \frac{6zh}{L_v^2} \quad (2)$$

где z – значение прогиба, *мм*; h – толщина об-

разца, *мм*; L_v – расстояние между опорами, *мм*.

По диаграмме определены значения нагрузки и прогиба, соответствующие значениям относительной деформации крайних волокон, – 0,1 и 0,3 %. Скорость деформации при растяжении определена как отношение скорости перемещения подвижного элемента испытательной машины (v) к длине образца между кромками зажимов. При изгибе скорость деформации рассчитывается по формуле:

$$v = \frac{u \cdot L_v^2}{6h} \quad (3)$$

где u – скорость деформации крайних волокон образца, равная 0,01 *мин⁻¹*; L_v – расстояние между опорами, *мм*; h – толщина образца, *мм*.

Получены следующие графики зависимости изменения механических свойств матрицы от времени облучения УФ-излучением при полимеризации (рисунки 1–4).

ВЫВОД

Предложен оригинальный технологический процесс изготовления стелечного узла, включающего в себя геленок, выполненный из стеклопластика. Особенностью техпроцесса является совмещение изготовления геленка со сборкой стелечного узла и возможность автоматизации процесса, что позволяют: исключить ручные операции, сократить расходы на производство, повысить производительность процесса и качество продукции. Повышение механических характеристик материала реализуется методами химической и физической модификации. Техпроцесс позволяет исключить влияние фактора длительности полимеризации композиционного материала на производительность производства. Формирование стелечного узла и обеспечение его установленных характеристик непосредственно на производстве позволяет изменять характеристики стелечного узла в соответствии с разрабатываемыми на предприятии моделями обуви, предоставит большую свободу дизайнерам, оптимизирует обувь под анатомическое строение стопы человека.

В ходе работы проведено опытное исследование зависимости механических характеристик эпоксидной матрицы от времени облучения

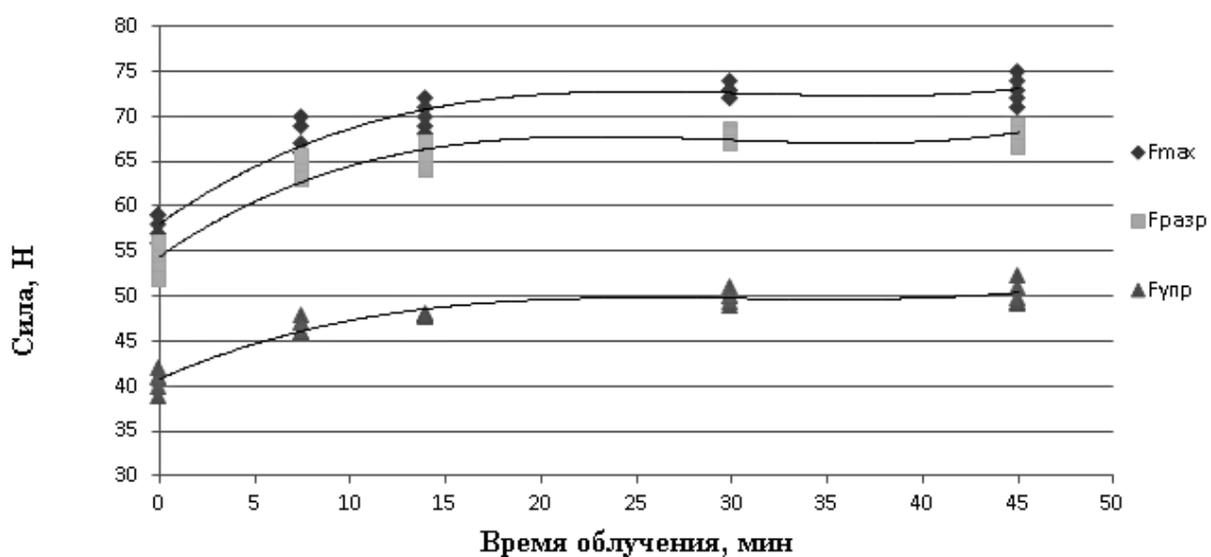


Рисунок 1 – Результат испытания на изгиб

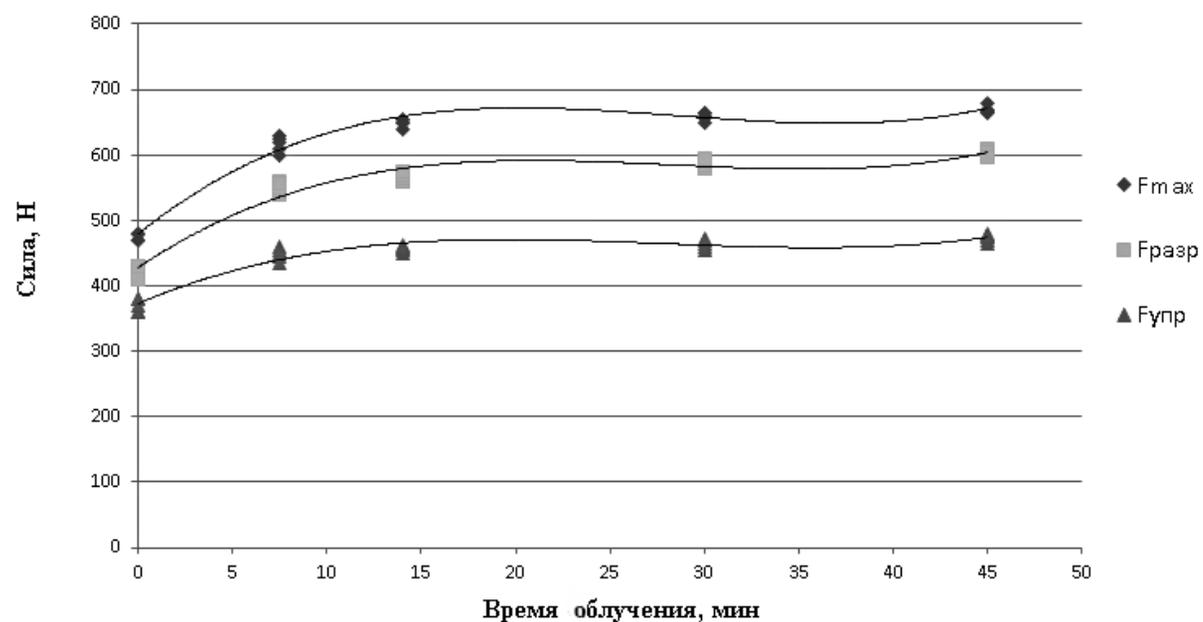


Рисунок 2 – Результат испытания на растяжение

при полимеризации материала. В результате облучения УФ-излучением эпоксидной смолы ЭД-20 при полимеризации механические характеристики повысились на 15–20 %. Наибольшее

увеличение характеристик происходит на 8–10 минуте воздействия. Результаты эксперимента доказывают, что данный метод физической модификации полимерной матрицы обладает вы-

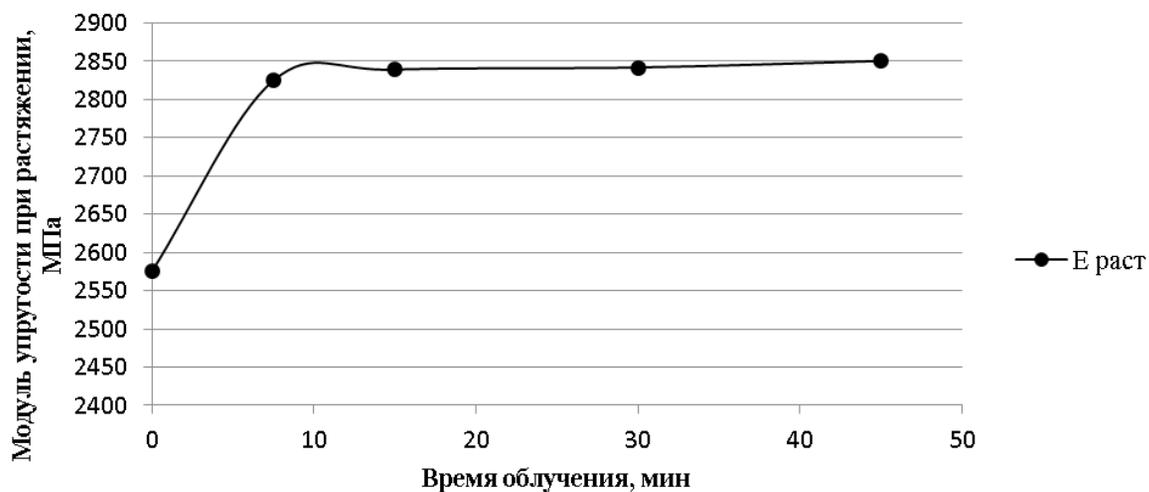


Рисунок 3 – Изменение модуля упругости при изгибе

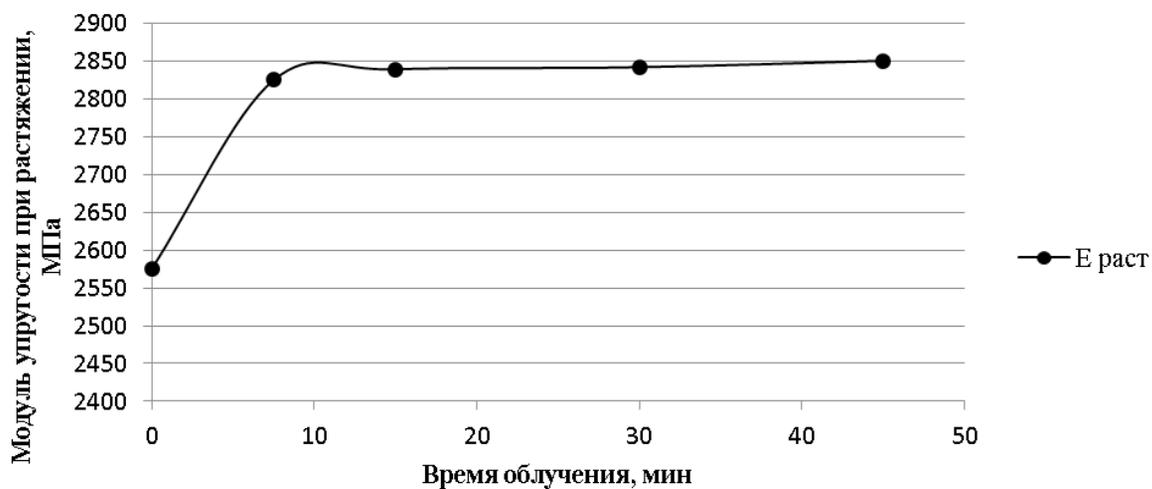


Рисунок 4 – Изменение модуля упругости при растяжении

сокой эффективностью.

Разработанная технология изготовления геленка из композиционного материала на основе стеклопластика учитывает требования к производству геленков и преимущества отечественной сырьевой базы, позволит решить вопрос импортозамещения, повысить качество стелечного узла, расширить ассортимент выпускаемой продукции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Великанова, Т. Ф. (2004), Методика проектирования геленков, *Рынок легкой промышленности*, 2004, № 40, С. 28–31.
2. Бондалетова, Л. И., Бондалепов, В. Г. (2017), *Полимерные композиционные материалы*, Томск, 117 с.
3. Горбачик, В. Е. (2000), *Проектирование и испытание геленков*, Витебск, 84 с.
4. Каримова, Л. К., Ахметшина, А. И., Дебердеев, Т. Р. (2019), *Производство изделий из стеклопластиков, материалы, технологии и методы испытаний*, Казань, 105 с.
5. Киселев, Б. А. (1961), *Стеклопластики*, Москва, 237 с.
6. Голубев, Е. В., Романов, В. В. (2021), Обзор и анализ технологий производства композитов, *Цифровая наука*, 2021, № 4-3, С. 12–16.
7. Холодников, Ю. В. (2016), Способы изготовления изделий из композитов, *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2016, № 6-2, С. 214–221.
8. Кестельман, В. Н. (1980), *Физические методы модификации полимерных материалов*, Москва, 224 с.

REFERENCES

1. Velikanova, T. F. (2004), Gelenki design methodology [Metodika proektirovaniya gelenkov], *Light industry market*, 2004, № 40, pp. 28–31.
2. Bondaletova, L. I., Bondalepov, V. G. (2017), *Polymerne kompozicionnye materialy* [Polymer composite materials], Tomsk, 117 p.
3. Gorbachik, V. E. (2000), *Proektirovanie i ispytanie gelenkov* [Design and testing of gelenki], Vitebsk, 84 p.
4. Karimova, L. K., Akhmetshina, A. I., Deberdeev, T. R. (2019), *Production of fiberglass products. materials, technologies and test methods* [Proizvodstvo izdelij iz stekloplastikov materialy tekhnologii i metody ispytaniy], Kazan, 105 p.
5. Kiselev, B. A. (1961), *Stekloplastiki* [Fiberglass], Moscow, 237 p.
6. Golubev, E. V., Romanov, V. V. (2021), Review and analysis of composites production technologies [Obzor i analiz tekhnologij proizvodstva kompozitov], *Cifrovaya nauka – Digital Science*, 2021, № 4-3, pp. 12–16.
7. Kholodnikov, Yu. V. (2016), Methods of manufacturing products from composites [Sposoby izgotovleniya izdelij iz kompozitov], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovaniy – International Journal of Applied and Basic Research*, 2016, № 6-2, pp. 214–221.
8. Kestelman, V. N. (1980), *Fizicheskie metody modifikacii polimernyh materialov* [Physical methods of modification of polymer materials], Moscow, 224 p.

Статья поступила в редакцию 25. 10. 2021 г.