

**Материаловедение  
и технологии материалов  
Materials science and materials technology**

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 621.9.047/048  
doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-80-89

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПРЕПРЕГОВ НА ЭПОКСИДНОМ СВЯЗУЮЩЕМ  
С ИСТЕКШИМ СРОКОМ ХРАНЕНИЯ**

**Александр Евгеньевич Зверовщиков<sup>1✉</sup>, Владислав Витальевич Крылов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

<sup>1</sup> azwer@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7827-7462>

<sup>2</sup> vlad.krylov2000@yandex.ru

**Аннотация**

Показаны перспективы применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях различных технических систем. Констатируется, что несмотря на расширение применения термопластичных полимеров, сохраняется тенденция к преимущественному использованию термопластичных (в частности, эпоксидных) связующих. Это связано с лучшей смачиваемостью большинства волокон данными полимерами, что обеспечивает качественную равномерную пропитку наполнителя при использовании технологии вакуумной инфузии. Отмечен серьезный недостаток эпоксидных связующих с ограниченным сроком хранения препрегов, из которых формируется изделие, и невозможностью повторной переработки ПКМ, сформированных из них. Это создает определенные трудности для утилизации препрегов с истекшим сроком хранения. Предложен и экспериментально обоснован способ переработки таких материалов в высоконаполненные слоистые композиционные детали типа «пластина» путем послойной выкладки с воздействием ультразвука. Показано, что контролируемое размягчение связующего без его терми-

ческой деструкции под действием ультразвука и создание определенного давления позволяет достичь соединения слоёв в композитную структуру. Определены рациональные технологические параметры (амплитуда колебаний 15–20 мкм, статическое давление 0,16–0,19 МПа, температура в области воздействия 80–90 °С). Показано, что полученные на указанных режимах образцы соответствуют по изгибной прочности образцам, полученным по традиционной технологии прессования из годных препрегов, а в области значений деформаций 0,3 мм и менее даже существенно их превосходят. Результаты исследований могут быть использованы для решения проблемы утилизации препрегов на основе эпоксидных связующих с истекшим сроком хранения путем изготовления из них изделий с пониженными требованиями к долговечности, работающих преимущественно в области малых деформаций при действии внешних нагрузок.

**Ключевые слова:** препрег, воздействие, изделия, материалы, композит, связующее, адгезия, расслоение, напряжение, изгиб.

*Ссылка для цитирования:*

*Зверовщиков А.Е. Технологические особенности применения ультразвука при изготовлении композиционных конструкций из препрегов на эпоксидном связующем с истекшим сроком хранения / А.Е. Зверовщиков, В.В. Крылов // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 8. – С. 80-89. doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-80-89.*

Original article  
Open Access Article

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF ULTRASOUND APPLICATION  
IN THE MANUFACTURE OF COMPOSITE STRUCTURES  
MADE OF PRE-PREGS WITH AN EXPIRED EPOXY**

## Abstract

The prospects of using polymer composite materials (PCM) in the designs of various technical systems are shown. It is stated that despite the expanded use of thermoplastic polymers, there remains a tendency towards the predominant use of thermoplastic (in particular, epoxy) binders. This is due to the better impregnation of most fibers with these polymers, which ensures high-quality uniform impregnation of the filler using vacuum infusion technology. There is a serious shortage of epoxies with a limited expiration of pre-pregs which form the product, and the possibility of recycling PCMs made of them. This creates certain difficulties for the disposal of expired pre-pregs. A method is proposed and experimentally substantiated for processing such materials into highly filled layered composite plates by layering with ultra-sound. It is shown that controlled softening of the binder without its thermal destruction under the action of ultrasound and the creation of a

certain pressure makes it possible to achieve the connection of the layers into a composite structure. Rational technological parameters are determined such as oscillation amplitude of 15-20 microns, static pressure of 0.16–0.19 MPa, temperature in the range of 80-90°C. It is found out that the samples obtained in these modes correspond in bending strength to the samples obtained using traditional pressing technology from suitable pre-pregs, and in the range of deformations of 0.3 mm or less, they even significantly exceed them. The research results can be used to solve the problem of utilization of pre-pregs based on expired epoxies by manufacturing products from them with reduced durability requirements, working mainly in the field of small deformations under the action of external loads.

**Keywords:** pre-preg, impact, products, materials, composite, binder, adhesion, delamination, stress, bending.

## Reference for citing:

Zverovshchikov AE, Krylov VV. Technological features of ultrasound application in the manufacture of composite structures made of pre-pregs with an expired epoxy. *Transport Engineering*. 2026;8:80-89. doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-80-89.

## Введение

В настоящее время расширяются как области применения, так и объемы производства полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях промышленности. Это определяется высокой удельной прочностью ПКМ по сравнению с металлами и сплавами и возможностью формировать заданные по условиям эксплуатации свойства одновременно с формообразованием изделия [1-3].

В тоже время, в производстве изделий из ПКМ по-прежнему велика доля ручного труда, что создает предпосылки к нестабильности полученных свойств. [4, 5].

Характерной особенностью производства изделий из ПКМ на современном этапе и в перспективе является смещение приоритетов в сторону производства нагруженных конструкций, в том числе динамическими силами (подвеска и диски колес, а также трансмиссионные валы автомобилей, стрингеры и нервюры авиационной техники и др.). С целью повышения

прочностных характеристик таких изделий широко применяется создание новых составов полимерных связующих, расширение применения так называемых «суперконструкционных» термопластов, например, полиэфирэфиркетона, с повышенными физико-механическими свойствами, химическая активация поверхности армирующих волокон путем применения замасливателей и аппретов, физических воздействий [6]. Однако, термопласты отличаются плохой совместимостью с армирующими материалами, особенно с волокнами, прежде всего неполная смачиваемость вследствие высокой вязкости и плохой текучести, а также быстрое отверждение. Вследствие этого в процессе отверждения в структуре слоя и в межслойном пространстве возникают различные пустоты и непроклеи, что приводит к уменьшению физико-механических свойств конечного изделия, поскольку не на все волокна матрица распределяет действующую внешнюю нагрузку.

В связи с изложенным ПКМ из препрегов на основе реактопластов сохраняют более широкое применение в авиа-, автомобиле- и судостроении. Однако ограниченный срок хранения таких препрегов (обычно 6–12 месяцев при температуре – 18 °С) в случае отсутствия в них потребности приводит к образованию значительного количества отходов, пригодных лишь для утилизации или низкотемпературного

### Постановка задачи

Как уже указывалось, производство изделий из ПКМ как не терморективного, так и термопластичного связующего отличается высокой долей ручного труда. Использование аддитивных технологий (3D печать) изготовления изделий наплавлением полимерных нитей (филаментов) с одновременным армированием слоев непрерывным волокном (аналог процесса FDM) является важным резервом автоматизации производства конструктивных элементов из ПКМ [8]. Однако, изделия, полученные этим методом, пока отличаются невысокой прочностью, особенно на сдвиг и на отрыв одного слоя от другого. Также в настоящее время особенности технологии FDM позволяют обеспечить невысокий коэффициент заполнения изделия армирующим компонентом в пределах от 11 до 30 %, в то время, как оптимальным считается (60...70 %) [4]. Альтернативной аддитивной технологией является послойное ламинирование *LOM*, согласно которой при помощи термовалика, лазера или ультразвукового воздействия осуществляется последовательное объединение (консолидация) слоев ламината. При этом происходит чередование консолидации слоев с вырезкой контура (соединение-раскрой) или соединение слоев с предварительно вырезанным контуром («раскрой-соединение») [9]. В последнем случае могут консолидироваться как вырезанные контуры, так и выкладываемые препреги в виде ленточек (ровингов).

Среди отмеченных выше технологических методов соединения слоев наибольшие перспективы имеет процесс консолидации слоев путем ультразвукового (УЗ) воздействия, как обеспечивающий

сжигания. Известные способы регенерации (химическая активация, введение пластификаторов) либо дороги, либо ухудшают прочностные характеристики [7].

Изложенное делает актуальным разработку ресурсосберегающих технологий изготовления конструктивных элементов транспортного и энергетического машиностроения из препрегов на терморективном, в частности, эпоксидном связующем.

лучшее качество по сравнению с использованием термовалика, так и более экономически выгодный по сравнению с использованием воздействия лазера.

В последнее время ультразвуковое воздействие при формировании изделий из слоистых ПКМ стало применяться и к весьма перспективным на основе «суперконструкционных» полимеров типа полиэфирэфиркетона (PEEK) [10, 11] благодаря полученным новым научно-практическим результатам.

Как известно, ультразвуковая консолидация представляет собой процесс соединения слоев полимерного материала под действием высокочастотных механических колебаний (обычно 20...40 кГц) при одновременном приложении статического давления. Данный метод нашёл применение в различных областях: от изготовления биомедицинских имплантатов до производства крупногабаритных деталей в авиа- и автомобилестроении. В последние годы активно развивается метод ультразвуковой консолидации, позволяющий получать монолитные изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [12].

Процесс ультразвуковой консолидации полимерных композитов основан на трансформации акустической энергии в тепловую в зоне соединения. В литературе выделяют два основных механизма теплогенерации: фрикционный и вязкоупругий нагрев [13, 14].

Фрикционный нагрев возникает вследствие относительного перемещения соединяемых поверхностей под действием ультразвуковых колебаний. Тепловая мощность при этом пропорциональна ча-

стоте колебаний, амплитуде и коэффициенту трения между слоями. Вязкоупругий нагрев обусловлен внутренним трением в полимерном материале при циклическом деформировании, что особенно значимо для полимеров в высокоэластическом состоянии.

Важной особенностью ультразвуковой консолидации является асимметричность температурного поля: максимальная температура достигается на границе раздела слоев, тогда как внешние поверхности остаются относительно холодными. Это позволяет избежать термоокислительной деструкции материала по всей толщине изделия [13].

Эффективность ультразвуковой консолидации определяется комплексом технологических параметров, ключевыми из которых являются амплитуда колебаний, статическое давление и время воздействия. Амплитуда колебаний является наиболее критическим параметром. Согласно данным [13, 14], для термопластичных композитов оптимальный диапазон амплитуд составляет 50...85 мкм. Недостаточная амплитуда не обеспечивает необходимого тепловыделения для плавления матрицы; чрезмерная амплитуда приводит к разрушению армирующих волокон и локальной деструкции полимера. Время воздей-

ствия определяет степень проплавления и количество энергии, введенной в зону соединения.

Статическое давление обеспечивает плотный контакт между слоями и способствует удалению воздуха и летучих продуктов из зоны соединения. Оптимальные значения давления варьируются в диапазоне 0,5...3,0 МПа в зависимости от типа связующего и архитектуры армирования композита.

Однако, большинство работ, посвящённых ультразвуковой сборке изделий из ПКМ, путем послойной консолидации описывают методы локального расплавления термопластичных полимеров, выполняющих роль матрицы в композиционном материале, а затем их прессования [10–14]. Работы по применению УЗ для соединения препрегов на термореактивном связующем единичны, а для препрегов с истекшим сроком хранения отсутствуют. Отсутствие решения по практическому использованию таких материалов создает экологические проблемы по их утилизации.

В соответствии с изложенным цель настоящей работы заключается в обосновании возможности изготовления слоистых пластин из эпоксидных препрегов с истекшим сроком хранения путем ультразвукового воздействия, пригодных к практическому использованию.

## Методика исследований

При УЗ-соединении монослоев ПКМ (препрегов) различают непрерывную и дискретную обработку [14]. Принципиальное отличие дискретной консолидации от непрерывной заключается в характере подведения энергии и формировании зоны соединения. Если при непрерывной схеме воздействия инструмент-концентратор перемещается вдоль поверхности материала, формируя протяженную зону, то при дискретной консолидации он остается неподвижным относительно заготовки в течение всего цикла соединения на данном участке, затем он отводится вверх и перемещается в следующую точку с определённым шагом, и так повторяется многократно [14]. Это накладывает специфические требования к управлению процессом и определяет особенности структуры по-

лучаемых соединений.

Локализация энергического воздействия – является ключевой характеристикой дискретного процесса. В отличие от непрерывного воздействия, когда тепловыделение распределено вдоль траектории движения инструмента, при точечной консолидации вся энергия ультразвуковых колебаний концентрируется в ограниченной области, размер которой определяется геометрией рабочего торца инструмента. Это обеспечивает высокую локальность нагрева и минимизирует зону термического влияния на армирующие волокна.

В соответствии с изложенным применяли дискретную схему УЗ воздействия.

Использовали образцы в виде полос длиной 120 и шириной 10 мм из препрега с истекшим сроком хранения толщиной

0,2 мм, образованного углеродными ро-вингами с армированием 0-90 на связую-щем ЭД-20 с отвердителем ПЭПА в соот-ношении 10:1 об. Для оценки влияния УЗ консолидации на физико-механические свойства ПКМ использовали образцы с аналогичными размерами, вырезанные из пластины углепластика размерами 500х500х3 мм, производства ООО «Евро-комплект» г. Калуга. Эта группа являлась контрольной. Количество образцов в опытной и контрольной группах для про-ведения повторных опытов принималось равным пяти. Пластина была изготовлена по действующей на данном предприятии технологии методом прессования после инфузионной пропитки связующим.

Для проведения экспериментов по УЗ консолидации препрегов с истекшим сро-ком хранения использовали лабораторную ультразвуковую установку с пьезокерами-ческим преобразователем и транзисторным генератором выходной мощностью 100 Вт (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторная УЗ установка  
Fig. 1. Laboratory ultrasonic installation

Генератор обеспечивал тонкую настройку частоты выходного напряжения в диапазоне 21...25 кГц для обеспечения сохранения условий резонанса колеба-тельной системы «преобразователь-волновод-инструмент». Применен ступен-чатый инструмент-концентратор из стали 40Х, закаленный до твердости 35...38 HRCэ с диаметром выходной сту-пени 14 мм, что обеспечивало надежное перекрытие пятен дискретного воздей-ствия на образцы соединяемых препрегов. Путем настройки выходного напряжения

генератора в резонанс с колебательной си-стемой обеспечивалась амплитуда колеба-ний 20...25 мкм. Как показали предвари-тельные постановочные опыты, примене-ние меньших амплитуд не обеспечивает стабильного соединения препрегов. Грави-тационная подача колебательной системы с учетом диаметра выходной ступени ин-струмента-концентратора обеспечивала давление в области воздействия порядка 0,16 МПа. Суммарное время УЗ воздей-ствия на каждом шаге составляло 20. Каж-дые 5 с при помощи тепловизора DT-986S определяли распределение температурного поля на образце и у выходного торца ин-струмента-концентратора.

Образцы изготавливались с шагом 10...11 мм, чтобы пятно области контакта инструмента с соединяемым слоем пере-крывало предыдущее не менее чем на 10 %. Изготовление образца производится до момента, когда соединение последнего наложенного слоя препрега заготовки не осуществимо с текущими параметрами УЗ обработки, или консолидация этого слоя происходит столь медленно, что продол-жение изготовления образца технологиче-ски нецелесообразно.

Образцы опытной и контрольной групп испытывали в соответствии с ГОСТ Р 56810-2015 по схеме трехточечного из-гиба при помощи цифрового пресса ПМ-МГ4 СКБ «Стройприбор», г. Челябинск, позволяющего контролировать скорость нагружения и фиксировать текущие значе-ния нагрузки и соответствующей дефор-мации.

В соответствии с ГОСТ Р 56810-2015 определяли напряжения при заданной де-формации определялись по формуле:

$$\sigma_{\text{И}}^{\text{В}} = \frac{3F_l L}{2bh^2},$$

где  $F_l$  – нагрузка при определённом проги-бе, Н;  $L$  – пролет между опорами, мм;  $b$  – ширина образца, мм;  $h$  – толщина образца, мм.

Выбранный метод исследования обу-словлен тем, что с учетом различных тех-нологий формирования образцов указан-ных групп, представляла интерес кинетика изменения напряжений с ростом деформа-ции.

По рассчитанным значениям напряжений определяли среднее значение дан-

ного параметра для каждой группы образцов.

### Результаты и обсуждение

Образец из препрегов с истекшим сроком хранения был изготовлен толщиной 3,5 мм. Количество слоёв препрега составило 8. При попытке консолидировать 9-й слой препрега время соединения в начальной точке превысило 31 секунду, что не обеспечивает приемлемую производительность УЗ обработки. Очевидно, для

соединения большего количества препрегов необходимо повышать амплитуду колебаний, соответственно должна быть увеличена выходная мощность генератора. Значения температуры в начальной и завершающей стадии процесса и области, который она фиксировалась, представлены на термограммах рис. 2.

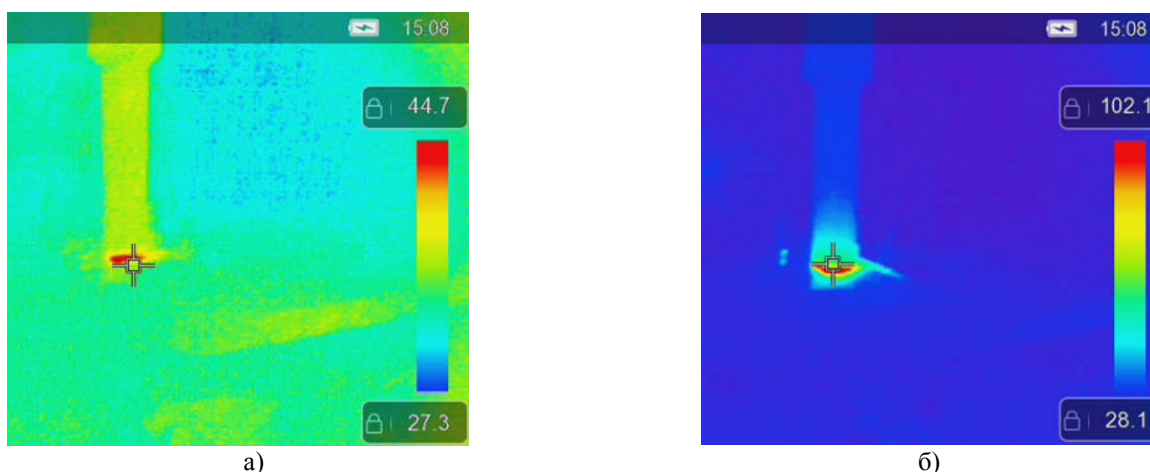


Рис. 2. Термограммы области контакта инструмента-концентратора УЗ колебаний и слоев препрегов: через 5 с - а, через 20 с - б после начала обработки

Fig. 2. Thermograms of the contact area of the ultrasonic vibration concentrator and pre-preg layers: 5 s - a, 20 s - b after the start of processing

Максимальные значения температуры отмечаются на образце непосредственно вблизи контакта с торцом концентратора, в то время, как температура самого концентратора составляет порядка  $(35-40)^{\circ}\text{C}$ . Нарастание температуры в области контакта происходит скачкообразно на первых секундах воздействия, далее происходит постепенно. При принятых условиях эксперимента максимально достигнутые температуры находятся в области  $(100-110)^{\circ}\text{C}$ , что составляет пограничную область температур для эпоксидного связующего, выше которого начинаются деструктивные процессы. Температуры порядка  $(80-90)^{\circ}\text{C}$  наблюдались стабильно через 15-17 с после начала воздействия.

Результаты испытаний по схеме трехточечного изгиба представлены в таблице и на рис. 3. Можно заметить, что по мере нарастания значения изгибной де-

формации величина соответствующих напряжений в опытных и контрольных образцах начинает сближаться и при значении 1,3 мм становится идентичной, что свидетельствует о практически равноценном качестве образцов, сформированных при помощи УЗ воздействия, и полученных по стандартной технологии инфузии и прессования.

Следует отметить, что в области малых (менее 0,3 мм) значений деформаций наблюдаются существенно большие значения напряжений при трехточечном изгибе опытных образцов по сравнению с контрольными. Этот эффект убывает с увеличением прогиба от 0,1 до 1 мм с 300 % до 13 % по ряду: 3,0 – 1,26 – 1,49 – 1,19 – 1,13. Это свидетельствует о высокой адгезионной прочности сформированного контакта между связующим и наполнителем и когезионной прочности между слоями по свя-

зующему. В тоже время было отмечено расслоение концевых участков опытных образцов при достижении значения де-

формации 1,3 мм, что привело к потере образцами несущей способности, чего не наблюдалось в контрольных образцах.

Таблица

Изменение значений напряжений при трехточечном изгибе исследованных образцов  
(средние значения по 5-и повторным опытам)

Table

*Change in stress values during three-point bending of the samples under study  
(average values for 5 repeated experiments)*

| Прогиб, мм<br>$\sigma_{\text{и}}^B$ , МПа | 0,1  | 0,2   | 0,3  | 0,4   | 0,5   | 0,7   | 1,0   | 1,3    |
|-------------------------------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| После УЗ воздействия                      | 15,4 | 23,3  | 45,5 | 52,0  | 72,3  | 116,7 | 158,7 | 172,08 |
| Прессованные                              | 5,08 | 18,56 | 30,5 | 43,57 | 71,13 | 96,8  | 139,9 | 172,0  |

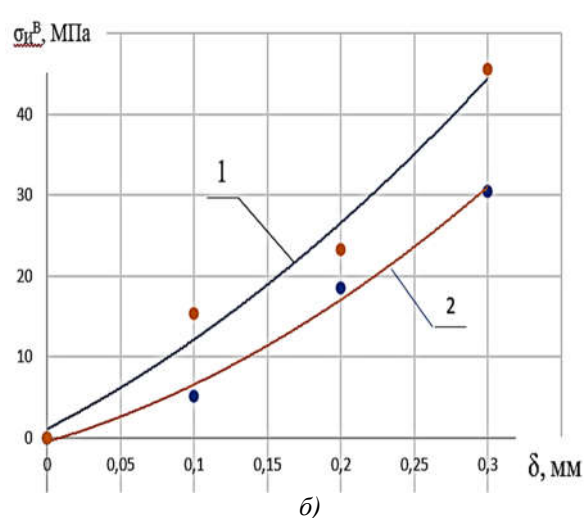
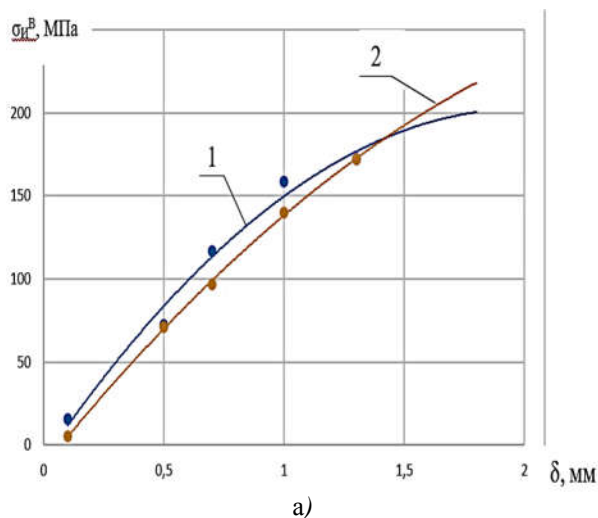


Рис. 3. Зависимость напряжений от значений изгибной деформации образцов, полученных при УЗ воздействии на препреги с истекшим сроком хранения (1), и контрольных образцов, вырезанных из пластин эпоксидного углепластика, полученных прессованием по стандартной технологии (2): а – зависимость при полной деформации, б – в области малых деформаций

*Fig. 3. Dependence of stresses on the values of bending deformation of samples obtained by ultrasonic action on expired pre-pregs (1) and control samples cut from epoxy carbon fiber plates obtained by pressing according to standard technology (2): a – dependence at full deformation, b – in the area of small deformations*

Исследование области повреждения опытных и контрольных образцов показало следующее (рис. 4, 5). В области максимальных значений деформаций (в среднем сечении) опытных образцов не отмечается видимых расслоений и трещин (рис. 4а). Как уже указывалось выше, опытные образцы характеризуются значительными расслоениями на концах (рис. 4б). У контрольных образцов основные повреждения (трещины и расслоения) наблюдаются в области среднего сечения (рис. 5а, б).

Механизм полученных результатов может быть описан с учетом известных работ [15-17] в которых авторы указывают

на сохранение подвижности крайних звеньев полимерной сетки сшитого реактопласта в условиях его временного перехода в область размягчения при нагреве до температур, не вызывающих деструктивных изменений.

Под воздействием ультразвуковых колебаний вследствие межслойного и межфазного трения происходит повышение температуры до значений, способствующих временному переходу эпоксидного связующего в область размягчения. Совместное действие статического давления и динамической силы ультразвуковых колебаний торца инструмента приводит к

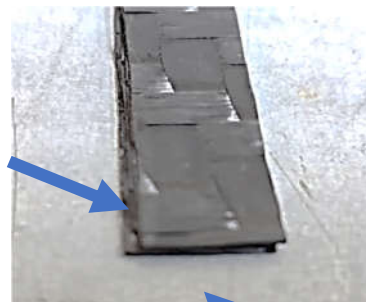


заполнению несплошностей в структуре препрегов и диффузии микроструктурных образований полимерной матрицы контактирующих слоев. После снятия УЗ воздействия происходит снижение температуры

до исходного значения и доотверждение полимера, способствующее формированию новых адгезионных и когезионных связей в слоистом композите.



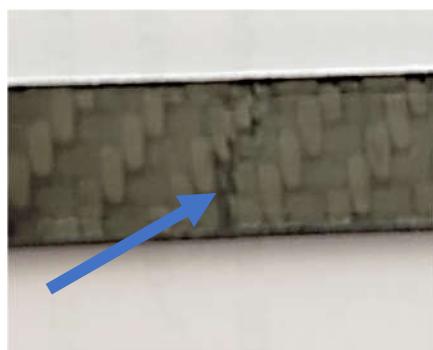
а)



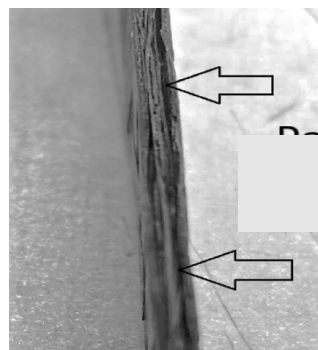
б)

Рис. 4. Типичная область максимальных изгибных деформаций в среднем сечении опытного образца, сформированного при помощи УЗ обработки из препрегов с истекшим сроком хранения - а, видимых повреждений не выявлено. Область расслоения на крайних участках образцов - б

Fig. 4. Typical area of maximum bending deformations in the middle section of a prototype formed using ultrasonic processing from expired pre-pregs - a, no visible damage is detected. The area of delamination in the end sections of samples - b



а)



б)

Рис. 5. Типичная область максимальных изгибных деформаций в среднем сечении контрольного образца, отмечаются трещины на внешней поверхности - а и расслоения - б

Fig. 5. Typical area of maximum bending deformations in the middle section of of the control sample, cracks on the outer surface (a) and delaminations (b) are noted

## Закключение

Выполнены исследования влияния значений изгибной деформации на напряжения при трехточечном изгибе образцов углепластика на эпоксидном связующем, полученных различными методами: ультразвуковой консолидацией препрегов с истекшим сроком хранения и вырезанных из пластин промышленного углепластика, полученного методом прессования.

Установлено, что ультразвуковое послойная консолидация препрегов на эпоксидном связующем путем дискретного ультразвукового воздействия возможна за счет достижения температур временного перехода матрицы в область размягчения,

что позволяет реализоваться процессам текучести и заполнения пустот между волокнами препрега, а также диффузии между матрицей соседних препрегов. При этом в области малых деформаций обеспечиваются соизмеримые или большие по сравнению с промышленными образцами значения напряжений.

Предлагаемый технологический метод после более широкой апробации и внедрения позволит решить экологическую проблему утилизации эпоксидных препрегов с истекшим сроком хранения путем их использования в производстве малонагруженных конструкций.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филатов А.И. Мировой рынок полимерных композиционных материалов: состояние, тенденции, перспективы. Часть 1 / А.И. Филатов // *Полимерные материалы* № 7 (314) 2025 г., с. 24-29.
2. Филатов А.И. Мировой рынок полимерных композиционных материалов: состояние, тенденции, перспективы. Часть 2 / А.И. Филатов // *Полимерные материалы* № 8 (315) 2025 г., с. 46-49.
3. Филатов А.И. Мировой рынок полимерных композиционных материалов: состояние, тенденции, перспективы. Часть 3 / А.И. Филатов // *Полимерные материалы* № 9 (316) 2025 г., с. 46-51.
4. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб. : Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
5. Serge Abrate Impact Ingeneering of Composite Structures. – Springer-Wien-NewYork. - 2011. p.p.409.
6. Increased strength in carbon-poly(ether ether ketone) composites from material extrusion with rapid microwave post processing // *Аддитивное производство* 60(7):103209  
DOI:10.1016/j.addma.2022.103209.
7. Петров А. В., Дориомедов М. С., Скрипачев С. Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2015. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-utilizatsii-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor> (дата обращения: 12.04.2026).
8. Оборудование и технология для обеспечения прочностных характеристик полимерных изделий при 3D-печати композитным филаментом / Зверовщиков А.Е., Бантыш И.В., Зверовщиков В.З. // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2024. № 1 (69). С. 163-176.
9. Гибсон Я. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер; М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
10. Ultrasonic welding of PEEK plates with CF fabric reinforcement – the optimization of the process by neural network simulation / Alexenko V.O., Panin S.V., Stepanov D.Yu., Byakov A.V., Bogdanov A.A., Buslovich D.G., Panin K.S., Tian D. // *Materials*. 2023. Т. 16. № 5. С. 2115.
11. Otimization of ultrasonic welding parameters for laminate PEEK-based composites with carbon fiber prepreg / Panin S.V., Byakov A.V., Alexenko V.O., Buslovich D.G., Panin K.S., Tian D. // *Procedia Structural Integrity*. 2023. Т. 50. С. 220-227.
12. Волков Станислав Степанович, Прилуцкий Максим Андреевич Технологические особенности ультразвуковой сварки композиционных материалов на полимерной основе // *Известия вузов. Машиностроение*. 2016. №3 (672). С. 39-48.
13. Predictive Thermal Modeling and Characterization of Ultrasonic Consolidation Process for Thermoplastic Composites // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 145. – Iss. 3. – NSF-PAR ID: 10415683.
14. Хмельёв Владимир Николаевич, Сливин Алексей Николаевич, Абрамов Алексей Дмитриевич Совершенствование ультразвуковой сварки и создание аппаратов для её реализации // *Известия ТПУ*. 2013. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-ultrazvukovoy-svarki-i-sozdanie-apparatov-dlya-eyo-realizatsii> (дата обращения: 12.04.2026).
15. Розенберг Б.А. Образование, структура и свойства эпоксидных матриц для высокопрочных композитов / Б.А. Розенберг, Э.Ф. Олейник // *Успехи химии*. Т. LIII. Вып. 2, 1984. С. 273-289.
16. Odegard G. M., Bandyopadhyay A. Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites // *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 2011. Vol. 49, № 24. P. 1695–1716.  
<https://doi.org/10.1002/polb.22384>
17. Жаворонок Е. С., Сенчихин И. Н., Ролдугин В. И. Физическое старение и релаксационные процессы в эпоксидных системах // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. 2017. Том 59, № 2. С. 113–149.  
<https://doi.org/10.7868/S2308112017020110>.

## REFERENCES

1. Filatov AI. The global market of polymer composites: state, trends, prospects. *Polymer Materials*. 2025;7(314):24-29.
2. Filatov AI. The global market of polymer composites: state, trends, prospects. *Polymer Materials*. 2025;8(315):46-49.
3. Filatov AI. The global market of polymer composites: state, trends, prospects. *Polymer Materials*. 2025;9(316):46-51.
4. Mikhailin YuA. Structural polymer composites. 2nd ed. St. Petersburg: Nauchnie Osnovi I Tekhnologii; 2010.
5. Serge Abrate Impact Ingeneering of Composite Structures. NewYork: Springer-Wien; 2011.
6. Increased strength in carbon-poly(ether ether ketone) composites from material extrusion with rapid microwave post processing. *Additive Manufacturing*. 60(7):103209.  
DOI:10.1016/j.addma.2022.103209.
7. Petrova AV, Doriomedov MS, Skripachev SYu. Technologies of utilization of polymer composites (review). *Trudy VIAM [Internet]*. 2015 [cited 2026 Dec 04];8. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii>

utilizatsii-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor

8. Zverovshchikov AE, Bantysh, IV, Zverovshchikov VZ. Equipment and technology for ensuring the strength characteristics of polymer 3D printing with composite filament. University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences. 2024;1(69):163-176.
9. Gibson Ya, Rosen D, Stacker B. Additive manufacturing technologies. Three-dimensional printing, rapid prototyping and direct digital production. Moscow: TECHNOSPHERE; 2016.
10. Alexenko VO, Panin SV, Stepanov DYU, Byakov AV, Bogdanov AA, Buslovich DG, Panin KS, Tian D. Ultrasonic welding of PEEK plates with CF fabric reinforcement – the optimization of the process by neural network simulation. Materials. 2023;16(5):2115.
11. Panin SV, Byakov AV, Alexenko VO, Buslovich DG, Panin KS, Tian D. Optimization of ultrasonic welding parameters for laminate PEEK-based composites with carbon fiber prepreg. Procedia Structural Integrity. 2023;50:220-227.
12. Volkov SS, Prilutsky MA. Technological features of ultrasonic welding of polymer-based composite materials. BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2016;3(672):39-48.

13. Predictive Thermal Modeling and Characterization of Ultrasonic Consolidation Process for Thermoplastic Composites. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2023;145(3):NSF-PAR ID:10415683.
14. Khmelev VN, Slivin AN, Abramov AD. Improvement of ultrasonic welding and development of devices for its implementation. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University [Internet]. 2013 [cited 2026 Dec 04];4. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-ultrazvukovoy-svarki-i-sozdanie-apparatov-dlya-eyo-realizatsii>
15. Rosenberg BA, Oleinik EF. Formation, structure and properties of epoxy matrices for high-strength composites. Russian Chemical Reviews. 1984;2:273-289.
16. Odegard GM, Bandyopadhyay A. Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites. J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys [Internet]. 2011;49(24):1695–1716. Available from: <https://doi.org/10.1002/polb.22384>
17. Zhavoronok ES, Senchikhin IN, Roldugin VI. Physical aging and relaxation processes in epoxy systems. Vysokomolekulyarnie Soedineniya. Series A [Internet]. 2017;59(2):113-149. Available from: <https://doi.org/10.7868/S2308112017020110>.

#### Информация об авторах:

**Зверовщиков Александр Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование машиностроения» Пензенского политехнического института, тел. 8-937-400-23-93.

**Zverovshchikov Aleksandr Evgenievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, Penza Polytechnic Institute, phone: 8-937-400-23-93.

**Крылов Владислав Витальевич** – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, тел. 8-917-322-00-7.

**Krylov Vladislav Vitalievich** – Postgraduate student at the Department of Mechanical Engineering Technology at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, phone: 8-917-322-00-7.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 13.03.2026; одобрена после рецензирования 04.06.2026; принята к публикации 26.06.2026. Рецензент – Петраков О.В., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 13.03.2026; approved after review on 04.06.2026; accepted for publication on 26.06.2026. The reviewer is Petrakov O.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.