

УДК 620.22:678.7

DOI 10.62595/1819-5245-2026-2-71-81

## МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТОДАМИ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ В ВАННЕ

**В. Б. ХОДЕР, Е. И. КОРДИКОВА***Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск*

*Исследовано влияние методов предварительной обработки компонентов на механические характеристики при растяжении композиционных фотополимерных материалов, применяемых в аддитивных технологиях фотополимеризации в ванне. В качестве матричного материала использована коммерческая фотополимерная смола марки Formlabs, а в качестве наполнителя – измельченные отвержденные отходы той же смолы, что позволяет реализовать принципы циркулярной экономики и снизить себестоимость производства. В рамках работы проведена оценка влияния предварительного нагрева матричного полимера и наполнителя, а также ультразвуковой обработки композиции и установлено, что механическое введение наполнителя в объеме 10 и 20 мас. % в фотополимерную систему без дополнительной обработки приводит к снижению прочности системы. Отмечено, что применение методов предварительной обработки позволяет повысить прочностные характеристики до 45 % при нагреве относительно наполненной системы и до 47 % – при ультразвуковой обработке. Выявлены механизмы улучшения свойств, связанные с повышением адгезии и равномерностью распределения частиц, а результаты подтверждают перспективность использования вторичных материалов.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, фотополимерная система, композиционный материал, фотополимеризация в ванне, стереолитография, механические характеристики.

**Для цитирования.** Ходер, В. Б. Механизмы повышения прочности при растяжении в фотополимерных композиционных системах для аддитивных технологий методами фотополимеризации в ванне / В. Б. Ходер, Е. И. Кордикова // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 2 (105). – С. 71–81. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-71-81>

## MECHANISMS FOR INCREASING TENSILE STRENGTH IN PHOTOPOLYMER COMPOSITE SYSTEMS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES USING BATH PHOTOPOLYMERIZATION METHODS

**V. B. KHODER, E. I. KORDIKOVA***Belarusian State Technological University, Minsk*

*The effect of component pretreatment methods on the tensile mechanical properties of composite photopolymer materials used in vat photopolymerization additive technologies was investigated. A commercial Formlabs photopolymer resin was used as the matrix material, and ground cured waste of the same resin was used as the filler, which enables the implementation of circular economy principles and a reduction in production costs. The study assessed the effects of preheating the matrix polymer and filler, as well as ultrasonic treatment of the composition. It was found that mechanical introduction of 10 and 20 wt. % filler into the photopolymer system without additional treatment leads to a decrease in the system's strength. It was noted that the use of pretreatment methods allows for an increase in strength characteristics of up to 45 % upon heating relative to the filled system and up to 47 % upon ultrasonic treatment. Mechanisms for improving properties associated with increased adhesion and uniform particle distribution were identified, and the results confirm the potential of using recycled materials.*

**Keywords:** additive manufacturing, photopolymer system, composite material, vat photopolymerization, stereolithography, mechanical properties.

**For citation.** Khodzer V. B., Kordikova E. I. Mechanisms for increasing tensile strength in photopolymer composite systems for additive technologies using bath photopolymerization methods. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 2 (105), pp. 71–81 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-71-81>

## Введение

Актуальность применения высокотехнологичных методов изготовления изделий из полимеров и композиционных материалов (КМ) является основой построения конкурентного производственного блока внутри страны. В последние десятилетия аддитивные технологии (трехмерная печать) все чаще находят применение при производстве средств малой техники, проектировании различной номенклатуры изделий, дизайне, медицине, ремонте и замене компонентов оборудования и прочих направлениях. Активный рост популярности аддитивного производства, в первую очередь, связан с преимуществами технологии по сравнению с классическими методами. Одними из таких преимуществ являются сокращение геометрических ограничений, накладываемых на процессы проектирования, снижение затрат на разработку и мелкосерийное производство, сокращение этапов разработки изделий [1–5].

Одним из перспективных направлений в аддитивном производстве является применение фотополимерных смол, отверждаемых при воздействии ультрафиолетового излучения или видимого спектра – технологии фотополимеризации в ванне. Наиболее актуальным является применение фотополимерных материалов в методах лазерной стереолитографии (SLA) [6]. Применение методов послойного отверждения фотополимерных систем дает практически изотропную структуру в материале, высокую точность и расширяет возможности геометрии и формы изделия для производства [3–4, 7–8].

Несмотря на технологические преимущества, существенным ограничением применения SLA-технологии является дефицит материалов на рынке [6], а также недостаточный уровень механических характеристик фотополимерных материалов. Особенно критичным является поведение материалов при растяжении, поскольку данный вид нагружения характеризуется высокой чувствительностью к дефектам структуры, межфазным границам и неоднородностям распределения наполнителя.

Не менее важной является проблема накопления отходов фотополимеризации, которые не могут быть повторно использованы традиционными методами переработки [9]. Введение вторичных наполнителей в виде измельченных мелкодисперсных частиц на основе отвержденных отходов является перспективным решением, однако может сопровождаться ухудшением прочностных характеристик вследствие нарушения сплошности матрицы [10].

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка методов повышения адгезионного взаимодействия и однородности структуры композиционных материалов. Одним из эффективных подходов является предварительная обработка компонентов, включающая предварительный нагрев матрицы, наполнителя или системы в целом [11–14] и ультразвуковое воздействие на наполнитель до смешения или композицию при смешении [15].

Научный базис рециклинга отходов фотополимеризации в ванне в аддитивном производстве на текущий момент не сформирован. В то время как большинство исследований сосредоточено на модификации систем традиционными дисперсными наполнителями, вопрос вторичной вовлеченности измельченных отходов в производственный цикл или другие методы их утилизации остаются неизученными и под-

вержены активному обсуждению в практическом сообществе. Данный пробел в области аддитивного производства определяет актуальность темы на данном этапе развития общества.

Целью работы является оценка степени влияния методов предварительной обработки компонентов КМ на основе фотополимерной системы, наполненной отвержденными измельченными отходами для технологии лазерной стереолитографии, на механические характеристики при растяжении.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования применялась фотополимерная смола Clear Resin (Formlabs, США) и композиционная система на ее основе, наполненная отвержденными измельченными отходами технологии фотополимеризации в ванне (Clear, White и Grey Resin компании Formlabs) с размером частиц 50–60 мкм и содержанием 10 и 20 мас. %.

Разработка композиционной системы включает в себя этап подготовки исходных материалов, предварительную обработку компонентов, смешение и непосредственно изготовление образцов методом лазерной стереолитографии.

На первом этапе подготовки компонентов, в частности, получения наполнителя для последующих исследований, производилась сортировка отходов технологии, доотверждение (при необходимости) систем с содержанием жидкой фазы с последующей промывкой в изопропиловом спирте и сушкой на открытом воздухе в течение 4 ч.

На втором этапе отходы сортировались по размеру фракции и подвергались поэтапному механическому измельчению ударным методом в крестовой ударной мельнице Retsh SK 100 (Retsh, Германия) с последующим измельчением на планетарной мельнице с использованием стальных шариков для повышения эффективности получения фракции 50–60 мкм [21].

Смешение и предварительная обработка компонентов и композиционной системы проводились непосредственно перед процессом изготовления образцов с целью исключения влияния внешних факторов на точность эксперимента. В качестве методов обработки компонентов применяли нагрев наполнителя и матричного полимера, а также смешение композиционной системы в ультразвуковой ванне.

Смешение компонентов композиционной системы проводилось в ручном режиме с приготовлением высококонцентрированной суспензии в соотношении 1 : 1 и в последующем использовалось для создания необходимой концентрации (10 и 20 мас. %) введением жидкого матричного фотополимера.

Нагрев жидкой фазы композиционного фотополимерного материала (КФМ) проводился на глицериновой бане при температуре 60, 75 и 90 °С и выдержкой в течение 20 мин для равномерного нагрева во всем объеме полимера (рис. 1, а). Нагрев наполнителя проводился в муфельной печи при температуре 60, 75 и 90 °С в течение 20 мин (рис. 1, б). Диапазон температур определялся результатами предварительных исследований отвержденной системы дифференциальной сканирующей калориметрией, которая выявила химические изменения в структуре полимера при температурах выше 100 °С.

Для обработки ультразвуком подготовленная композиционная система помещалась в ручную ванну ELEMENT CD-2840 A (CODYSON, КНР) (рис. 1, в) мощностью 50 Вт и частотой 42 кГц, в которой выдерживалась с непрерывным воздействием в течение 20, 40 и 60 мин. Повышение температуры при обработке контролировалось на всем этапе обработки во избежание перегрева выше 40 °С.

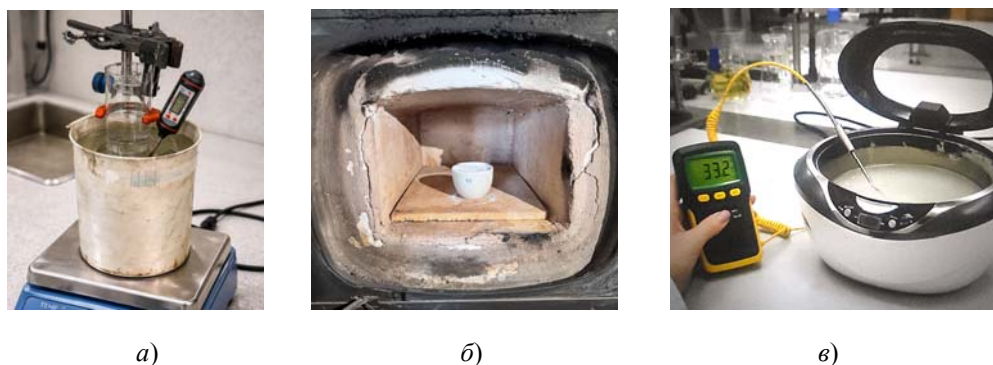


Рис. 1. Предварительная обработка компонентов:  
а – нагрев матричного полимера; б – нагрев наполнителя;  
в – ультразвуковая обработка

Изготовление твердых образцов для испытаний проводили на стереолитографической машине, работающей по технологии фотополимеризации в ванне Form 2 (Formlabs, США) с параметрами, рекомендованными производителем с целью минимизации влияния сторонних факторов на конечные экспериментальные данные. Образцы при подготовке к печати располагались в специализированном программном обеспечении PreForm на рабочей поверхности под углом  $45^\circ$  к каждой из направляющих осей, что позволяет минимизировать смещения, связанные с перемешиванием смолы во время печати. Поддерживающие структуры выстраивались строго на плоскости во избежание возникновения дефектов на ребрах модели при их удалении.

Напечатанные образцы промывались в изопропиловом спирте в течение 30 мин в автоматической машине для очистки FormWash (Formlabs, США) для удаления остатков неотвержденной смолы с поверхности. Просушенные образцы подвергались дополнительной засветке в камере доотверждения FormCure (Formlabs, США) с мощностью 39 В при условиях, рекомендованных производителем материала, – при температуре  $60^\circ\text{C}$  в течение 60 мин.

Определение упруго-прочностных характеристик при растяжении проводили в соответствии с ГОСТ 34370-2017 на образцах типа I, который согласуется со стандартом ASTM D638-14, указанным в технических паспортах как применяемый производителем материала. В качестве исследуемых параметров определяли прочность при разрыве, модуль упругости при растяжении и коэффициент Пуассона.

Эксперимент проводили на универсальной испытательной машине MTS CRITERION 43 (MTS Systems Corporation, США) с применением соответствующих клиновых захватов FXSA104B и электронного двухосевого экстензометра модели 632.85F-05 с базой 25 мм. Измерение проводилось с автоматической записью данных и последующей обработкой в программном пакете Microsoft.

Изучение структуры отвержденных образцов до и после разрушения проводилось методом электронной микроскопии с применением оптического микроскопа Altamі MET 5C (Альтами, Россия).

### Результаты и обсуждение

Исследования влияния методов предварительной обработки в виде однофакторных сравнительных испытаний наряду с исследованиями чистой фотополимерной смолы и наполненной композиции без предварительной обработки позволяют определить наиболее эффективные режимы получения КМ для достижения оптимальных результатов по показателям упруго-прочностных характеристик.

Результаты экспериментальных исследований упруго-прочностных характеристик при растяжении в зависимости от метода предварительной обработки представлены на рис. 2 и 3.

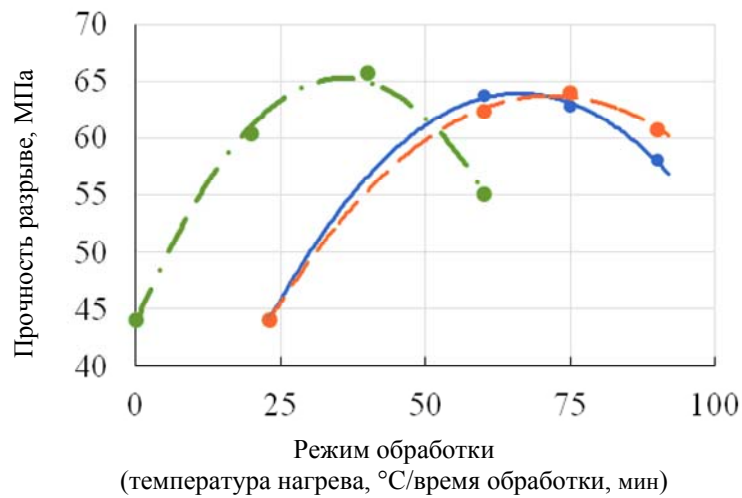


Рис. 2. Зависимость предела прочности при разрыве в зависимости от режима предварительной обработки композиционного материала:

- предварительный нагрев наполнителя, °C;
- - - предварительный нагрев матрицы, °C;
- - · - предварительная обработка ультразвуком, мин

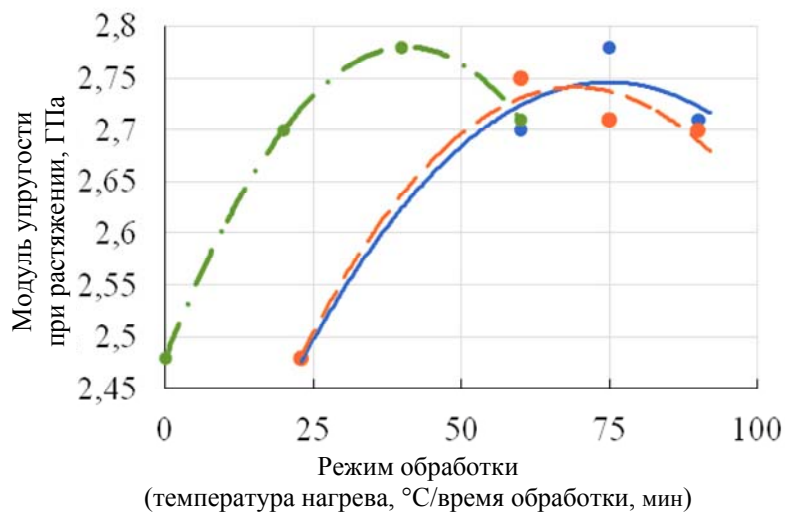


Рис. 3. Зависимость модуля упругости при растяжении в зависимости от режима предварительной обработки композиционного материала:

- предварительный нагрев наполнителя, °C;
- - - предварительный нагрев матрицы, °C;
- - · - предварительная обработка ультразвуком, мин

Упруго-прочностные характеристики с различными режимами обработки представлены в таблице.

## Упруго-прочностные характеристики с оптимальными режимами обработки

Состав	Метод и режимы обработки	Прочность при разрыве $\sigma_p$ , МПа	Модуль упругости при растяжении $E_p$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\mu$	
Clear Resin	Без обработки	53,75	2,85	0,35	
Clear Resin + 10 % наполнителя	Без обработки	44,00	2,48	0,25	
Clear Resin + 20 % наполнителя	Без обработки	43,16	2,45	0,24	
Clear Resin + 10 % наполнителя	Нагрев наполнителя, °С	60	63,79	2,70	0,29
		75	62,63	2,78	0,29
		90	58,12	2,71	0,29
	Нагрев матричного полимера, °С	60	62,54	2,75	0,29
		75	63,98	2,71	0,29
		90	60,71	2,70	0,29
	УЗ-обработка, мин	20	60,45	2,70	0,29
		40	65,70	2,78	0,29
		60	55,03	2,71	0,28

Анализ полученных зависимостей показал, что применение нагрева наполнителя и матричного полимера позволяет достичь повышения прочностных показателей на 45 %. Нагрев компонентов выше 75 °С приводит к снижению положительного эффекта предварительной обработки на физико-механические характеристики при растяжении. Данный фактор может обуславливаться началом процессов деструкции внутри полимера, что также подтверждается потемнением наполнителя при обработке при повышенных температурах.

Применение ультразвукового перемешивания в течение 20, 40 и 60 мин как метода предварительной подготовки композиции позволяет повысить прочность при разрыве на 25–47 % и модуля упругости – на 9–12 %. Ультразвуковая обработка является наиболее эффективной, что также подтверждается видимой дегазацией композиции. При этом отмечается нагрев композиции в процессе обработки до 60 °С, а длительность обработки свыше 40 мин приводит к повышению температуры до 90 °С в объеме полимера, что также может являться причиной снижения положительного эффекта от предварительной обработки.

Анализ места (рис. 4) разрушения показал, что для чистого фотополимерного материала характерны признаки хрупкого разрушения с преимущественно транскристаллитным распространением трещины. Поверхность излома относительно ровная, с наличием фасеточных участков и выраженных зеркальных зон, переходящих в области с радиальными и параллельными линиями. Локально присутствуют участки с множеством микросколов. Данные факторы свидетельствуют об ограниченной способности материала к пластической деформации.

При введении наполнителя морфология поверхности становится более сложной и неоднородной. Характер излома сохраняет хрупкую природу, однако наблюдается увеличение неровности поверхности за счет отклонения траектории трещины при взаимодействии с частицами наполнителя. Эти механизмы способствуют дополнительному рассеянию энергии разрушения и снижению склонности к образованию множественных вторичных сколов. При использовании предварительной подготовки

компонентов КМ структура поверхности разрушения становится более однородной на микроуровне. Поверхность излома характеризуется равномерно развитой неровностью без выраженных крупных дефектных зон, при этом сохраняются признаки хрупкого разрушения с элементами отклонения трещины. Скол становится более ровным по отношению к направлению разрушения, однако имеет микрорельеф. Анализ поверхности указывает на более стабильный и энергетически менее локализованный процесс разрушения.

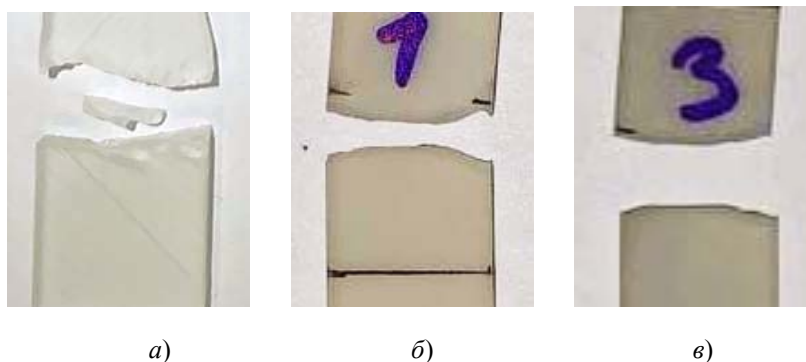


Рис. 4. Поверхность разрушения образцов:  
а – Clear Resin; б – Clear Resin + 10 мас. % наполнителя;  
в – Clear Resin + 10 мас. % наполнителя и УЗ-обработка композиции

Введение измельченного отвержденного наполнителя, несмотря на незначительные изменения в упругих характеристиках, приводит к формированию более ровной и сплошной поверхности излома, при этом разрушение происходит без образования мелких осколков. Это указывает на улучшение адгезии в материале, более равномерное распределение локальных напряжений.

Образцы после всех видов предварительной обработки характеризуются разрушением в поперечном направлении по секущей плоскости с образованием ровных поверхностей с незначительной шероховатостью и наличием наполнителя на поверхности. Таким образом, наполненные системы при предварительной обработке демонстрируют повышенную структурную устойчивость и способность к поглощению энергии при разрушении, что подтверждает эффективность введения переработанных отходов в качестве наполнителя.

Анализ результатов механических испытаний, а также микроскопический контроль позволяют сделать вывод о повышении упругих характеристик при введении наполнителя в фотополимерную систему, между тем снижение прочностных – до 20 %. При этом применение предварительного нагрева до температуры 60 °С или ультразвуковой обработки в течение 40 мин позволяют достичь повышения прочностных характеристик материала относительно исходного полимера на 22 % для растяжения. При этом отмечается незначительное снижение упругих характеристик при растяжении – на 3 %. При этом наиболее выраженный эффект наблюдается при ультразвуковой обработке, которая включает в себя нагрев в процессе перемешивания и воздействия ультразвуком на композицию.

Исходя из представленной информации можно сделать вывод о том, что предварительная обработка наполнителя оказывает определяющее влияние на формирование структуры и, как следствие, на механическое поведение композиционной системы. За счет разрушения агломератов и более равномерного распределения частиц в объеме полимерной матрицы обеспечивается снижение концентрации локальных дефектов и напряжений, а также увеличение площади эффективного межфазного

взаимодействия. Это приводит к более равномерному перераспределению приложенной нагрузки и повышению эффективности торможения и отклонения трещин при их распространении.

### **Заключение**

В результате проведения исследований получены сведения о влиянии методов предварительной обработки компонентов и КМ на основе фотополимерной смолы, наполненного отвержденными измельченными отходами, на упруго-прочностные характеристики при растяжении.

При печати, наполненной фотополимерной системой, выявлено снижение визуальной слоистости по сравнению с чистой фотополимерной смолой. Экспериментальное исследование влияния наполнителя на физико-механические характеристики КФМ показал, что его введение приводит к снижению прочности и упругости при растяжении на 18–20 %. При этом повышение содержания наполнителя от 10 до 20 мас. % ведет к незначительному снижению свойств – менее 2 %. Применение методов предварительной обработки компонентов КФМ существенно повышает упруго-прочностные характеристики при растяжении, что позволяет говорить о повышении адгезионной прочности (взаимодействии компонентов). Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии методов обработки, что позволяет повысить показатели прочности в 1,5 раза по сравнению с наполненной системой с содержанием 10 мас. % и в 1,2 раза по сравнению с ненаполненной системой.

Наибольший положительный эффект при предварительной обработке наблюдался при ультразвуковой обработке компонентов в течение 40 мин, при которой предел прочности при растяжении увеличился на 22 % по сравнению с чистым материалом Clear Resin.

Оптимальным диапазоном температуры нагрева матричного полимера и наполнителя является 60–75 °С. При этом последующее повышение температуры приводит к снижению прочностных характеристик, связанному с деградацией полимерной матрицы и образованию пузырей (дефектов) при закипании жидкой фазы.

Полученные данные позволяют выявить оптимальные режимы подготовки и смешения композиции. Новизна работы заключается в систематическом сравнении влияния различных методов предварительной подготовки компонентов КМ на физико-механические свойства композиций с применением отвержденных измельченных отходов. Применение ультразвукового смешения и контролируемого нагрева позволяет существенно повысить предел прочности и модуль упругости, что расширяет возможности применения материала, а также возможности снижения экологического следа при применении технологии фотополимеризации в ванне.

Полученные сведения могут быть применены при проектировании КМ для SLA-технологии в машиностроении, прототипировании, изготовлении функциональных деталей, а также в образовательных и научных лабораториях для дальнейших исследований, направленных на разработку композиционных фотополимерных систем с различными наполнителями.

Границы применимости результатов ограничены конкретным типом фотополимерной смолы и размером частиц наполнителя, однако могут являться основой для последующих исследований с адаптацией результатов для аналогичных материалов и технологий.

Таким образом, исследованные методы предварительной обработки компонентов КФМ с жидкой матрицей позволяют не только повышать физико-механические характеристики, но и эффективно использовать переработанные материалы, обеспечивая повышение конкурентоспособности и экологической эффективности аддитивного производства.

## Литература

1. Каминский, А. А. Анализ трендов рынков аддитивных технологий / А. А. Каминский, М. И. Ананич // Интерэкспо ГЕО-Сибирь : сб. материалов XIX Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 17–19 мая 2023 г. : в 8 т. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Сиб. гос. ун-т геосистем и технологий. – Новосибирск, 2023. – Т. 6. – С. 77–84. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-6-77-84
2. Голубев, И. Г. Анализ рынка аддитивных технологий / И. Г. Голубев, И. А. Спицын // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : материалы XI Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Рос. Федерация, Моск. обл., Пушкин. окр., пос. Правдинский, 5–7 июня 2019 г. / Рос. науч.-исслед. ин-т информации и техн.-экон. исслед. по инженер.-техн. обеспечению агропром. комплекса. – Пос. Правдинский, 2019. – С. 362–365.
3. Абрамов, А. А. Аддитивные технологии для медицины, фармацевтики и химической промышленности: применение и перспективы / А. А. Абрамов, Н. В. Меньшутина // Теоретические основы химической технологии. – 2023. – Т. 57, № 5. – С. 532–544. – DOI 10.31857/S0040357123050019
4. Banica, C.-F. Printing the Future Layer by Layer: A Comprehensive Exploration of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0 / C.-F. Banica, A. Sover, D.-C. Anghel // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, N 21. – P. 9919. – DOI 10.3390/app14219919
5. The Role of 3D Printing in Advancing Automated Manufacturing Systems: Opportunities and Challenges / A. Kantaros, C. Drosos, M. Papoutsidakis [et al.] // Automation. – 2025. – Vol. 6, N 2. – P. 21–32. – DOI 10.3390/automation6020021
6. Ходер, В. Б. Рынок материалов для технологий фотополимеризации в ванне (обзор) / В. Б. Ходер, Е. И. Кордикова, Г. Н. Дьякова // Труды БГТУ. Серия 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2024. – № 2 (283). – С. 184–193. – DOI 10.52065/2520-2669-2024-283-21
7. Recent advancements in stereolithography (SLA) and their optimization of process parameters for sustainable manufacturing / A. Husna, S. Ashrafi, A. A. Toma [et al.] // Hybrid Advances. – 2024. – Vol. 7. – P. 100307. – DOI 10.1016/j.hybadv.2024.100307
8. Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review / S. Iftekar, A. Aabid, A. Amir, M. Baig // Polymers. – 2023. – Vol. 15, N 11. – P. 2519. – DOI 10.3390/polym15112519
9. Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes / E. M. Maines, M. K. Porwal, C. J. Ellison, T. M. Reineke // Green Chemistry. – 2021. – Vol. 23, N 18. – P. 6863–6897. – DOI 10.1039/D1GC01489G
10. Ходер, В. Б. Перекрестное влияние содержания наполнителя и толщины слоя на механические характеристики фотополимерных систем / В. Б. Ходер, Е. И. Кордикова // Материалы 56-й Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, Витебск, 19 апр. 2023 г. : в 2 т. / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2023. – Т. 2. – С. 496–499.
11. Effects of pre-heating on physical-mechanical-chemical properties of contemporary resin composites / T. Bueno, N. Masoud, A. Akkus [et al.] // Odontology. – 2025. – Vol. 113, N 1. – P. 135–142. – DOI 10.1007/s10266-024-00953-x
12. Effect of preheating on the mechanical properties of resin composites / M. B. Uctasli, H. D. Arisu, L. V. Lasilla [et al.] // European Journal of Dentistry. – 2008. – Vol. 2, N 4. – P. 263–268.
13. Effect of preheating on mechanical properties of a resin-based composite containing elastomeric urethane monomer / J. M. Nascimento Batista, M. A. C. Sinhoreti, M. A. Alves Fraga [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2023. – Vol. 141. – P. 105758. – DOI 10.1016/j.jmbbm.2023.105758

14. Effect of pre-heating on the mechanical properties of silorane-based and methacrylate-based composites / N. Mohammadi, E. Jafari-Navimipour, S. Kimyai [et al.] // *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*. – 2016. – Vol. 8, N 4. – P. 373–378. – DOI 10.4317/jced.52807
15. Khan, A. S. Effect of Ultrasonic Vibration on Structural and Physical Properties of Resin-Based Dental Composites / A. S. Khan, M. S. Zafar, S. R. Habib [et al.] // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, N 13. – P. 2054. – DOI 10.3390/polym13132054

### References

1. Kaminskii A. A., Ananich M. I. Analysis of trends in additive technology markets. *Interexpo GEO-Sibir': sb. materialov XIX Mezhdunar. nauch. kongr., Novosibirsk, 17–19 maja 2023 g.* [Interexpo GEO-Siberia: Proceedings of the XIX International Scientific Congress, Novosibirsk, May 17–19, 2023]. Novosibirsk, Sibirskij gosudarstvennyj universitet geosistem i tehnologij, 2023, vol. 6, pp. 77–84 (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2023-6-77-84>
2. Golubev I. G., Spitsyn I. A. Analysis of the additive technology market. *Nauchno-informatsionnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK: materialy XI Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf., Ros. Federacija, Mosk. obl., Pushk. okr., pos. Pravdinskij, 5–7 ijunja 2019 g.* [Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Internet Conference, Russian Federation, Moscow Region, Pushkin District, Pravdinsky Settlement, June 5–7, 2019]. Pos. Pravdinskij, Rosinformagroteh, 2019, pp. 362–365 (in Russian).
3. Abramov A. A., Men'shutina N. V. Additive technologies for medicine, pharmaceuticals and the chemical industry: applications and prospects. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2023, vol. 57, no. 5, pp. 532–544 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0040357123050019>
4. Banica, C. F., Sover A., Anghel D.-C. Printing the Future Layer by Layer: A Comprehensive Exploration of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 21, art. 9919. <https://doi.org/10.3390/app14219919>
5. Kantaros A., Drosos C., Papoutsidakis M., Pallis E., Ganetsos T. The Role of 3D Printing in Advancing Automated Manufacturing Systems: Opportunities and Challenges. *Automation*, 2025, vol. 6, no. 2, pp. 21–32. <https://doi.org/10.3390/automation6020021>
6. Khoder V. B., Kordikova E. I., D'yakova G. N. Market of materials for vat photopolymerization technologies (review). *Trudy BGTU. Seriya 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geokologiya*, 2024, no. 2 (283), pp. 184–193 (in Russian). <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2024-283-21>
7. Husna A., Ashrafi S., Toma A. A., Arifin A. M. T., Sultana S., Shahriar S. M., Ali M. O. Recent advancements in stereolithography (SLA) and their optimization of process parameters for sustainable manufacturing. *Hybrid Advances*, 2024, vol. 7, art. 100307. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100307>
8. Iftekar S., Aabid A., Amir A., Baig M. Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 11, art. 2519. <https://doi.org/10.3390/polym15112519>
9. Maines E. M., Porwal M. K., Ellison C. J., Reineke T. M. Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes. *Green Chemistry*, 2021, vol. 23, no. 18, pp. 6863–6897. <https://doi.org/10.1039/D1GC01489G>
10. Khoder V. B., Kordikova E. I. Cross-influence of filler content and layer thickness on the mechanical characteristics of photopolymer systems: *materialy 56 Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. prepodavatelei i studentov, Vitebsk, 19 apr. 2023 g.* [Materials of the 56th International scientific and technical conference of teachers and students, Vitebsk, 19 Apr., 2023]. Vitebsk, Vitebskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2023, vol. 2, pp. 496–499 (in Russian).
11. Bueno T., Masoud N., Akkus A., Silva I., Mc Pherson K., Furuse A. Y., Rizzante F. Effects of pre-heating on physical-mechanical-chemical properties of contemporary resin composites. *Odontology*, 2025, vol. 113, no. 1, pp. 135–142. <https://doi.org/10.1007/s10266-024-00953-x>

12. Uctasli M. B., Arisu H. D., Lasilla L. V., Valittu P. K. Effect of preheating on the mechanical properties of resin composites. *European Journal of Dentistry*, 2008, vol. 2, no. 4, pp. 263–268.
13. Nascimento Batista J. M., Sinhoreti M. A. C., Alves Fraga M. A., Manoel da Silva M. V., Correr A. B., Roulet J. F., Geraldeli S. Effect of preheating on mechanical properties of a resin-based composite containing elastomeric urethane monomer. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, vol. 141, art. 105758. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105758>
14. Mohammadi N., Jafari-Navimipour E., Kimyai S., Ajami A. A., Bahari M., Ansarin M., Ansarin M. Effect of pre-heating on the mechanical properties of silorane-based and methacrylate-based composites. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 373–378. <https://doi.org/10.4317/jced.52807>
15. Khan A. S., Zafar M. S., Habib S. R., Alnazzawi A. A., Alrahabi M., Al-Thobity A. M., Karobari M. I., Heboyan A. Effect of Ultrasonic Vibration on Structural and Physical Properties of Resin-Based Dental Composites. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 13, art. 2054. <https://doi.org/10.3390/polym13132054>

Поступила 02.06.2026 г.