

наполнении передвижной емкости KARBONSAN в теплом и охлажденном состоянии внутренней оболочки.

### Список использованных источников

1. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Часть 1: Учебное пособие.– СПб: Университет ИТМО, 2017. – 95 с.
2. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Часть 2: учебно-методическое пособие.– СПб: Университет ИТМО, 2018. – 60 с.
3. Епифанова В.И. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Технология и оборудование. Т. 1. Термодинамические основы разделения воздуха, схемы и аппараты воздуходелительных установок. – М.: Машиностроение, 1973. – 468 с.

УДК 678.7-1

**В.Б. Ходер, Е.И. Кордикова, Г.Н. Дьякова**  
Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Беларусь

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ КОМПОЗИЦИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

*Аннотация.* В работе показано влияние вязкости композиции на кинетику отверждения и смачиваемость в процессах фотополимеризации в ванне. Представлены исследования влияния дисперсности и содержания наполнителя на вязкость композиционных систем на основе фотополимерной смолы, наполненной измельченными отходами отвержденных смол после технологии лазерной стереолитографии.

**V.B. Khodzer, E.I. Kordikova, H.N. Dyakova**  
Belarusian State Technological University  
Minsk, Belarus

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE VISCOSITY OF THE COMPOSITION ON THE TECHNOLOGICAL FEATURES OF LASER STEREOLITHOGRAPHY

*Abstract.* The paper shows the effect of the viscosity of the composition on the kinetics of curing and wettability in the processes of photopolymerization in the bath. Studies of the effect of

*dispersion and filler content on the viscosity of composite systems based on photopolymer resin filled with crushed waste of cured resins after laser stereolithography technology are presented.*

Среди обширного спектра выбора технологий аддитивного производства, существующих на данном этапе технологических разработок, благодаря универсальным инновациям и особенностям, связанным с химией полимеров, технологии фотополимеризации в ванне привлекают особое внимание материаловедов и инженеров. Аддитивные методы производства, основанные на фотополимеризации, такие как лазерная стереолитография (SLA), проекционная масочная стереолитография (DLP) и прямая ультрафиолетовая засветка (CLIP) позволяют с легкостью изготавливать сложные многофункциональные объемные изделия, иногда состоящие из нескольких тел, с контролируемыми оптическими, химическими и механическими свойствами [1].

Технологические процессы фотополимеризации в ванне основаны на использовании мономеров и олигомеров в жидком состоянии, которые совместно с фотоинициаторами под воздействием источника света определенной длины волны могут активно образовывать шитую полимерную структуру. С целью получения новых или модификации имеющихся материалов с конкретными физико-механическими, химическими и другими свойствами, в состав смеси могут вводиться добавки различного функционального назначения: красители, регуляторы, стабилизаторы, а также наполнители [2].

Для прохождения правильных реакций в процессе фотополимеризации и получения качественного конечного продукта на любые фотополимерные смеси накладывается ряд технологических ограничений, зависящих от метода производства. В частности, особое влияние уделяется смачиваемости поверхности и светочувствительности, которые зависят от вязкости продукта.

На рынке присутствует обширная база фотополимерных материалов с установленными реологическими свойствами для всех технологий фотополимеризации в ванне. Отдельной областью научно-практических исследований в сфере получения новых или модифицирования имеющихся материалов, является смешение композиционных систем на основе готовых фотополимерных матриц.

Основной проблемой при смешении композиционных систем является значительное изменение реологических характеристик материала, в частности повышение вязких свойств, и необходимость их регулирования за счет добавления диспергирующих добавок или растворителей. Исходя из этого первичный анализ технологичности

композиционных систем для фотополимеризации в ванне необходимо проводить оценкой изменения вязкости и её влиянием на кинетику отверждения смолы

Целью работы является определение влияния степени содержания наполнителя в фотополимерной системе и его дисперсности на технологические особенности лазерной стереолитографии.

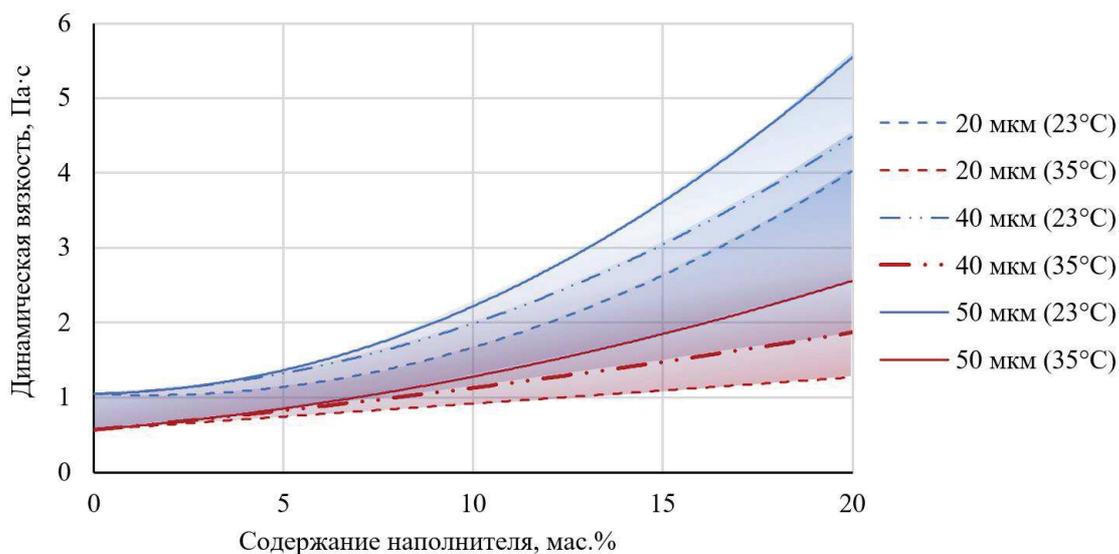
Основными задачами исследования являются оценка влияния содержания и дисперсности наполнителя на вязкость фотополимерной композиции и её влияние на кинетику отверждения и смачиваемость в процессах лазерной стереолитографии.

В качестве объекта исследования применялась композиционная система на основе фотополимерной смолы Formlabs Clear с добавлением измельченных отходов отвержденной смолы Formlabs различных марок (Clear, Gray, White) с содержанием 10 и 20 мас. % и размером частиц 20, 40 и 50 мкм.

Основным критерием оценки технологичности фотополимерной композиции является вязкость фотополимерной системы при температуре печати. В качестве опорных данных для сравнения применяется диапазон рекомендуемой вязкости для технологий фотополимеризации в ванне от 1 до 5 Па·с [3].

В трехмерной печати динамическая вязкость характеризует сопротивление жидкости смещению одного слоя относительно другого, а также относительно отвержденного слоя. Этот параметр напрямую зависит от внешних факторов, в частности от температуры окружающей среды и материала. Исходя из этого в качестве условий эксперимента устанавливались пороговые величины температур смолы в процессе печати, методом лазерной стереолитографии на оборудовании Form 2 – 23 и 35°C.

Динамическую вязкость определяли по шариковому вискозиметру Хепплера. По результатам исследований определили, что наличие наполнителя повышает вязкость композиционной системы. Зависимость вязкости от содержания и дисперсности наполнителя при установленных условиях представлена на рис. 1.



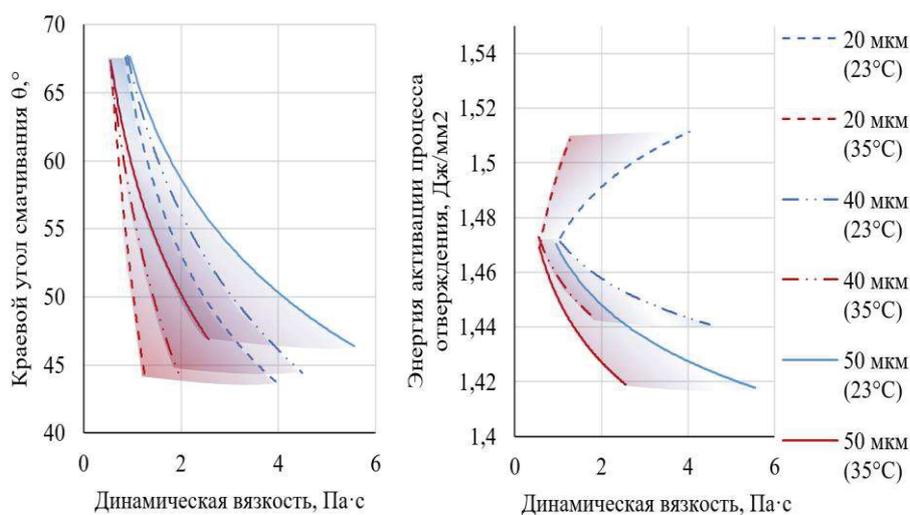
**Рис. 1 – Зависимость вязкости от содержания и дисперсности наполнителя при установленных условиях**

Увеличение размера используемых частиц приводит к повышению динамической вязкости, независимо от температуры смолы в пределах 20-50%. При наполнении смолы частицами с размером 50 мкм на 10 мас.%, вязкость увеличивается в 2,11 раза, а при введении до 20 мас.% – в 2,5 раза.

При этом отмечается, что повышение температуры среды снижает влияние наполнителя на динамическую вязкость, что связано с понижением вязкости матричного полимера. Установленная зависимость позволяет сделать вывод о возможности применения частиц с размером наполнителя больше исследуемого, а также с содержанием выше 20 мас.%, однако только при повышенных температурах печати.

Показатели смачиваемости композиционного материала оценивали по краевому углу смачивания от поверхности дна ёмкости, металлической платформы построения и отвержденного материала. При этом в качестве основы для исследования применяли пластину из отвержденного фотополимерного материала без наполнителя.

В результате проведенных исследований не было выявлено значительных отклонений угла смачивания от различных типов поверхностей и дисперсности вводимого наполнителя. Однако установлено, что смачиваемость зависит от состава жидкой фотополимерной системы и снижается при повышении концентрации наполнителя. Результаты исследований представлены на рис. 2.



**Рис. 2 – Зависимости технологических характеристик фотополимерной композиции от вязкости при установленных условиях**

Полученные экспериментальным путем данные указывают на достаточно высокую смачиваемость поверхности – в пределах 40–70°, что также подтверждается при визуальном наблюдении фотополимерных материалов в стеклянных колбах. С увеличением массового содержания частиц угол смачиваемости уменьшается. При этом увеличение фракции наполнителя приводит к незначительному снижению угла смачивания.

Для оценки экспозиционной проводимости фотополимерной композиции проводится исследование времени отверждения и времени гелеобразования смолы под воздействием установленного источника излучения. В качестве источника излучения использовали ультрафиолетовые лампы мощностью 36, 39 и 48 Вт. По данным зависимости экспозиции отверждения материала от толщины слоя строилась рабочая характеристика полимера, которая позволяет вычислить критическую экспозицию полимера, а также оценить влияние наполнителя на экспозиционную проницаемость.

Согласно полученным данным с увеличением содержания частиц размером 40 мкм от 10 до 20 мас.% соответственно в композиции незначительно увеличивается экспозиционная проницаемость на глубину материала. Изменение размера частиц с 40 на 50 мкм с содержанием 20 мас.% незначительно повышает экспоненциальную проводимость материала для глубины 0,2 мм на 7%. Для композиции 20 мас.% с размером частиц 20 мкм для глубины отверждения 0,2 мм заметно значительное снижение экспоненциальной проводимости относительно исходной матрицы – на 22%. Анализ результатов

исследований позволяет сделать предположение о наличии преломления энергии излучения при использовании наполнителя с фракцией менее 40 мкм, что приводит к снижению экспозиционной проводимости материала. При этом использование наполнителя с размером частиц в диапазоне от 40 до 63 мкм, повышает чувствительность к облучению композиционной системы.

Полученные в результате исследований характеристики позволяют сделать вывод о технологичности полученных в результате смешения композиционных систем и об их применимости в технологии лазерной стереолитографии. При этом рекомендуемыми являются фотополимерные композиции с содержанием наполнителя 10-20 мас.% и размером частиц 40-50 мкм.

### Список использованных источников

1. Bagheri, A., Jin, J. Photopolymerization in 3D Printing. ACS Applied Polymer Materials Journal, № 1(4), 2019 – P. 593–611.
2. Ходер В.Б., Кордикова Е.И., Дьякова Г. Н. Наполненные фотополимерные композиции для 3D-печати методом стереолитографии (обзор) // Труды БГТУ: Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С.27–32.
3. Weng, Z. [et al.]. 3D printing of ultra-high viscosity resin by a linear scan-based vat photopolymerization system // Z. Weng, X. Huang, S. Peng, L. Zheng, L. Wu. – Nature Communications Journal, vol. 14 (1), 2023. – P. 1–9.

УДК 543.544

**Н.А. Ходосова, Е.В. Томина, В.Е. Мануковская, Н.С. Коротаева**

Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г. Ф. Морозова  
Воронеж, Россия

### СОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ И СОСНЫ

*Аннотация.* Целью данного исследования является создание углеродных сорбентов на основе отходов деревоперерабатывающей промышленности – опилок сосны и березы для очистки сточных вод. Для увеличения сорбционной способности биоугли модифицировали 2М раствором КОН. Определили физико-