

4. Szycher M. Szycher's handbook of polyurethanes. Boca Raton: Taylor & Francis Group CRC Press, 2013. – 1092 p.

5. Ситникова В. Е., Практикум по колебательной спектроскопии: Учебное пособие / Т. Н. Носенко, В. Е. Ситникова, И. Е. Стрельникова, М. И. Фокина – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 173 с.

6. Durability of Building and Construction Sealants and Adhesives. / Wolf A.T. (Ed.) // Journal of ASTM International. – 2010. – Vol. XVII. – P. 417.

7. High-pressure impingement mixing route to faster, better PU parts. / Stengard R.A. // Plast. Tech. – 1974. – P. 41–44.

УДК 678.046:004.925.84

В. Б. Ходер, асп.;

Е. И. Кордикова, доц., канд. техн. наук;

Г. Н. Дьякова, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

## **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ НА СТРУКТУРУ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОЙ ФОТОПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ**

Одной из наиболее известных среди современных процессов аддитивного производства является технология лазерной стереолитографии (SLA), относящаяся к методам фотополимеризации в ванне. Ее принцип действия основан на послойном отверждении ультрафиолетовым лазером светочувствительной смолы или композиции в целях создания трехмерных объектов [1].

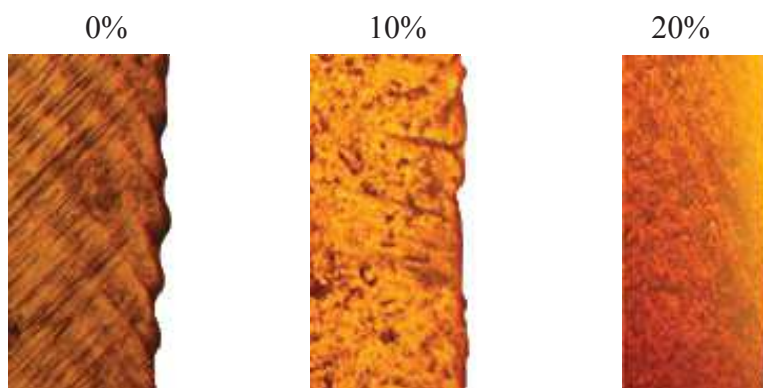
Отдельную нишу в мировом научном сообществе занимает разработка новых и модифицирование имеющихся материалов для SLA-технологии, которые в том числе подразумевают получение композиционных систем [1]. Интерес в данном вопросе в первую очередь связан со сложностью теоретического описания процессов, происходящих в объеме материала при фотополимеризации в ванне, а также оценки влияния на них различного рода наполнителей и модификаторов. Целью данной работы является определение влияния содержания наполнителя на структуру процесса отверждения композиционной фотополимерной системы для лазерной стереолитографии.

В качестве метода оценки применялось микроскопическое исследование поверхностей образцов из ненаполненной фотополимерной смолы Clear Resin V4 и с содержанием 10 и 20% наполнителя в виде измельченных отвержденных отходов процесса SLA-печати. Образцы изготавливались под 45° к рабочей поверхности аддитивной

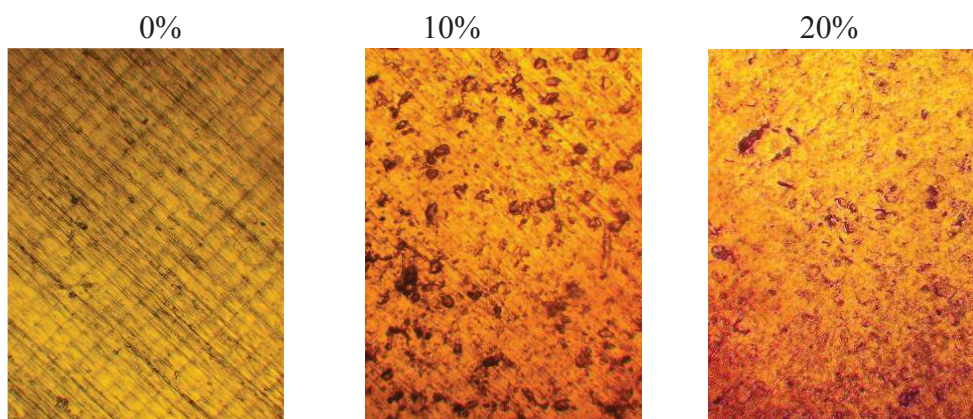
машины Form 2.

Снимки поверхностей образцов представлены на рисунках 1 и 2.

Микроскопическое исследование боковых поверхностей показало, что введение наполнителя снижает видимую ступенчатость слоёв. Изучение структуры образцов выявило наличие дополнительных линий, пересекающих ребра укладки слоёв строго под углом  $90^\circ$  для чистого материала и её постепенное размытие при введении наполнителя в систему. Для объяснения данного эффекта исследовали теоретические особенности прохождения процесса лазерной стереолитографии описанного законом Бутгера-Ламберта-Бера [2].



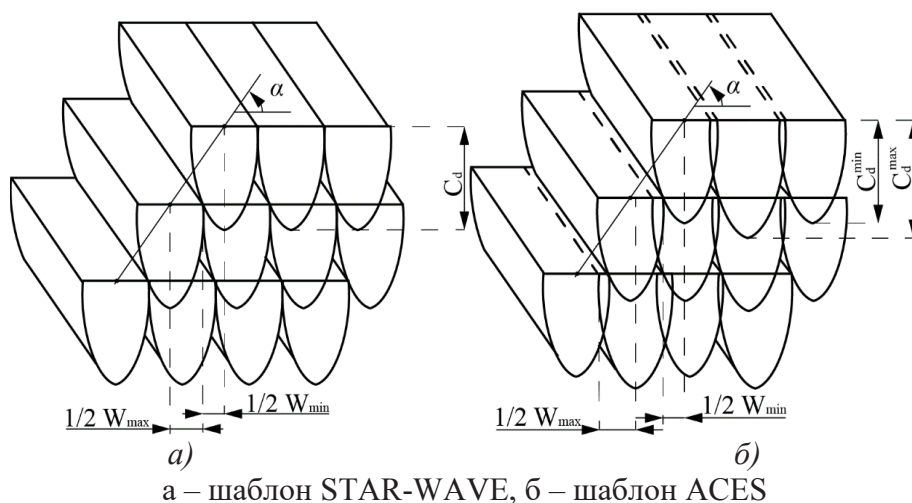
**Рисунок 1 – Боковая поверхность образцов без наполнения и с различным содержанием частиц**



**Рисунок 2 – Поверхность образцов без наполнения и с различным содержанием частиц**

С целью получения высококачественных моделей с высоким разрешением и низкими значениями усадки производители современного оборудования для лазерной стереолитографии (в том числе компания *Formlabs*) применяют различные схемы сканирования поверхности. Основным из применяемых является шаблон STAR-WAVE (рисунок 3а), имеющий установленную глубину сканирования ( $C_d$ ) и структурированные пути сканирования: расстояния между центрами

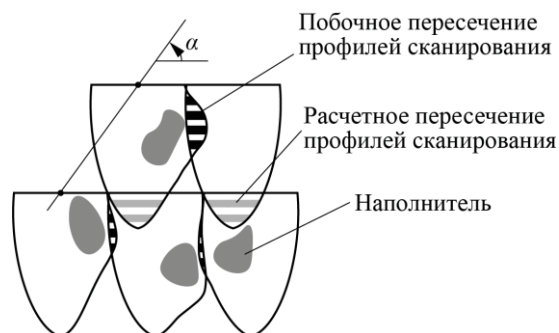
равно диаметру пучка лазера ( $W_{\max}$ ), смещение пути нового слоя центра определяется касанием нового профиля образующей предыдущего ( $W_{\max}/2 + W_{\min}/2$ ) [2–3].



а – шаблон STAR-WAVE, б – шаблон ACES  
**Рисунок 3 – Схема шаблонов сканирования фотополимерного материала в объеме слоёв**

Не смотря на высокую популярность шаблона сканирования STAR-WAVE она имеет некоторые области недостаточного отверждения, в которых процессы полимеризации были запущены частично. Решением данной проблемы является шаблон сканирования ACES (рисунок 3б) который регулирует расстояния между профилями сканирования и высоту сканирующего пятна (от  $C^{\min}$  до  $C^{\max}$ ), за счет изменения геометрии пути перемещения лазера и времени сканирования [2–3]. При применении любого из представленных шаблонов сканирования сцепка слоёв образуется в результате расчетного пересечения профилей сканирования, а в объеме полимера и на поверхности образуются так называемые линии областей недостаточного или избыточного отверждения. Введение наполнителя, имеющего способность отражать или пропускать потоки света с незначительным поглощением, приводит к деформации параболической формы сканирующего профиля. Такие геометрические изменения образуют побочное пересечение профилей, которое заполняет области недостаточного отверждения и стирает границы путей сканирования.

Данное явление оказывает значительное влияние на структуру получаемых изделий, позволяя получить более равномерные системы с большой площадью пересечения профилей сканирования. Поскольку неравномерное распределение и маленькая площадь пересечения профилей сканирования при тепловых процессах расширения и сжатия приводят к усадке изделий, то увеличение площади пересечения за счет введения наполнителя может позволить минимизировать данный эффект.



**Рисунок 4 – Измененная форма сканирования фотополимерного материала в объеме слоев при введении наполнителя**

Данный феномен подтверждается исследованием объемной усадки образцов, которая при увеличении содержания наполнителя снизилась с 1% до 0,3%.

Поскольку дальнейшая обработка светом готовых моделей не позволяет избавиться от визуальной слоистости и вызывает лишь увеличение значений усадки, то введение наполнителя является возможным методом получения визуально более однородных систем, а также снижения усадки в объеме изделия. Результаты данного исследования позволяют сделать вывод о целесообразности применения различного рода наполнителей при получении композиционных систем для лазерной стереолитографии, в том числе тех, которые могут незначительно снижать физико-механические свойства изделия, однако изменять их структуру. Кроме того, данное исследование позволило выявить новые функциональные характеристики для композиционной системы на основе Clear Resin, наполненных измельченными отвержденными отходами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: Техносфера, 2016. –656 с.
3. Methods and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography [Electronic resource]: pat. US5059359A / C. W. Hull [et.al.]. – Publ. date 22.10.1991. – Mode of access: <https://patents.google.com/patent/US5059359A/en?q=10%2c316%2c213>. – Date of access: 03.11.2023.