

И. В. Маркин, Е. А. Журбин, П. К. Потапов [и др.] // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 187–194. – doi: 10.17816/brmma75842.

4. Jia X. The collaborative effect of *Chlorella vulgaris* – *Bacillus licheniformis* consortia on the treatment of municipal water / X. Jia, H. Lia, J. Zhang, H. Saiyin, Z. Zheng // Journal of Hazardous Materials. – 2019. – Vol. 365. – P. 483–493. – doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.039.

5. Yao S. Microalgae-bacteria symbiosis in microalgal growth and biofuel production: a review / S. Yao, S. Lyu, Y. An, J. Lu, C. Gjermansen, A. Schramm // Journal of Applied Microbiology. – 2019. – Vol. 126. – No. 2. – P. 359–368. – doi: 10.1111/jam.14095.

УДК 502.174.1:678.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВТОРИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

Ходер Виктория Богуславовна, магистрант, преп.-стажер кафедры механики и конструирования, УО «Белорусский государственный технологический университет», Беларусь, г. Минск, vh58998673194@gmail.com

В условиях активной индустриализации мирового производства создается большая нагрузка на окружающую среду и накладываются значительные ценовые ограничения в потреблении дефицитных ресурсов. В целях предотвращения глобального экологического кризиса необходимо применение экологически эффективных и высокотехнологических методов производства. В условиях снижения материальных затрат и повторного использования сырьевых ресурсов применение аддитивных технологий методом лазерной стереолитографии в производственном секторе является высокоэкологичным на данном этапе научно-технического прогресса. В рамках работы рассмотрены метод и возможность применения переработанных отходов лазерной стереолитографии в производстве новых изделий.

Ключевые слова: стереолитография, переработка, вторичное применение, композиционные материалы, фотополимер, осаждение.

STUDY OF THE POSSIBILITY OF THE RECYCLING OF LASER STEREOLOGRAPHY WASTE

Khodzer V. B.

In the conditions of active industrialization of world production, a great burden is created on the environment and significant price restrictions are imposed on the consumption of scarce resources. In order to prevent a global environmental crisis, it is necessary to use environmentally efficient and high-tech production methods. In terms of reducing material costs and reusing raw materials, the use of additive technologies by laser stereolithography in the manufacturing sector is highly environmentally friendly at this stage of scientific and technological progress. As part of the work, the method and the possibility of using recycled laser stereolithography waste in the production of new products are considered.

Keywords: stereolithography, recycling, secondary use, composite materials, photopolymer, skin.

В реалиях современного мира, активного развивающегося в направлении научно-технического прогресса, вместе с решением многочисленных проблем человеческого существования также стремительными темпами усугубляется экологический кризис. Отсутствие полноценного решения проблем, возникающих в результате промышленного загрязнения окружающей среды, является одним из наиболее тяжелых факторов, усугубляющих состояние современной экологии. В условиях непрерывного продвижения индустриализации промышленные предприятия бесконтрольно загрязняют и наносят ущерб окружающей среде перерабатывая и используя дефицитные ресурсы. Поэтому активно развивающиеся страны все чаще применяют стратегию рационализации и регулирования поведения промышленных предприятий в окружающей среде.

Важное место среди методов экологической индустриализации человечества является применение в производственном секторе экологически эффективных инновационных технологий. Среди передовых методов производства отмечают технологии трехмерного проектирования (3D-печать).

Современные аддитивные технологии позволяют значительно сократить выход отходов в технологическом процессе, в отношении традиционных методов производства, благодаря подходу «добавления» материала, а не его удаления. Однако высокая стоимость и трудоемкость подготовки сырьевых ресурсов для данных технологий снижает технологичность и эффективность метода.

Технология аддитивного синтеза методом лазерной стереолитографии использует термореактивные полимеры в качестве материала построения и по сравнению с другими технологиями имеет ряд достоинств и позволяет получать высокоточные изделия сложных геометрических форм. Вместе с множеством преимуществ, помимо трудоемкости производства сырья, наиболее серьезным недостатком является вопрос утилизации и переработки, образующихся в ходе отработки технологи некачественных или бракованных изделий, а также поддерживающих структур. Подобные материалы не могут быть подвергнуты вторичной переработке ввиду специфики состава и свойств, получаемых в результате воздействия УФ-излучения (отверждение с образованием трехмерной структуры) [1].

Повышение экологической эффективности и технологичности метода позволяет достичь внедрение в состав первичных чистых материалов до 50 % отработанных отвержденных ресурсов аддитивного производства. Для оценки возможности применения данного метода утилизации сначала необходимо исследовать композицию из измельченного отвержденного полимера, диспергированного в связующем в виде жидкой фотополимерной смолы.

Целью исследования является оценка возможности переработки и применения термореактивных отходов SLA-печати в производстве новых изделий.

В качестве материала исследования выбрана стандартная прозрачная фотополимерная смола Clear Resin и ее технологические отходы: поддерживающие структуры, занимающие до 60 % материальных ресурсов конечных изделий, или бракованные и отработанные образцы изделий.

Ограничения на применение измельченных отходов в составе жидких фотополимеров в первую очередь связаны с условиями хранения композиции, возможными осаждением или всплыванием наполнителя, образованием пленки на поверхности, расслоением, аэрацией и неравномерностями распределения частиц в жидкой фазе.

Как химически активные вещества, фотополимерные материалы должны храниться в водонепроницаемой таре, закрытой от прямых солнечных лучей, в температуре, не превышающей рабочую температуру (18–34 °С). Это устанавливает первые ограничения в производство композиционных материалов на основе фотополимерных смол, применяемых в лазерной стереолитографии: отсутствие прямых солнечных лучей и чрезмерного нагрева при смешении. Дальнейшее исследование связывается с внешним видом, однородностью и сроками жизни композиции.

Мелкодисперсный измельченный наполнитель вводился в состав жидкого фотополимера в объемах 5, 10, 20, 30 и 50 % по массе со средним размером частиц 20, 35 и 55 мкм. Смешение производилось в ручном режиме, а также с использованием лабораторного диссольвера ПЭ-8100 со штативом ES-2720 с различными скоростями. Для получения однородной консистенции порошок вводится в смолу постепенно, с тщательным перемешиванием состава в течение 5 минут, во избежание образования пузырьков воздуха и комкования порошка.

Смешение материалов различной фракции и различного содержания не дает значительных отклонений в измеряемых температурах состава. График зависимости средней температуры композиционного состава от скорости смешения представлен на рисунке 1. Процесс смешения не вызывает чрезмерного нагрева композиционного материала, однако значительное повышение скорости вращения смесительного устройства приводит к актив-

ному образованию пузырьков воздуха. В результате помещения материала в технологическую область печати трехмерного принтера излишнее образование пузырей удаляется нагреванием оборудования и перемешивающей лопаткой.

Вместе с тем смешение в ручном режиме не сказывается на качестве получаемого сырья. Отсутствие необходимости применения аппаратного метода смешения позволяет сделать вывод о возможности поставки и хранения измельченного наполнителя в сухом виде с последующим смешением необходимого композиционного состава любым из представленных методов в условиях имеющегося производства.

В результате добавления визуально белого (от осаждаемой на поверхности мелкодисперсной пыли) измельченного порошка в состав жидкого прозрачного полимера получили густую мутную смесь темного цвета, что в первую очередь обусловлено затрудненным прохождением лучей света через дисперсионную среду. Микроскопическое исследование структуры фотополимерной композиции непосредственно после смешения позволяет сделать вывод о прозрачности имеющихся в составе мутной массы частиц, а также равномерности их распределения в матрице, независимо от метода и скорости смешения. Внешний вид наполнителя и полученной системы представлен на рисунке 2.

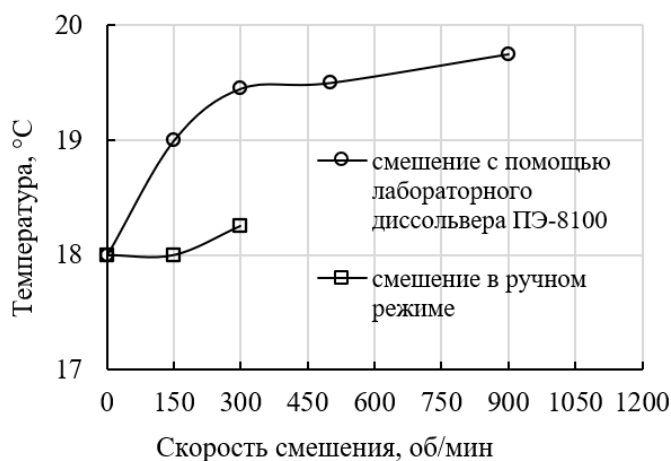


Рисунок 1 – График зависимости температуры композиционного состава от скорости перемешивания

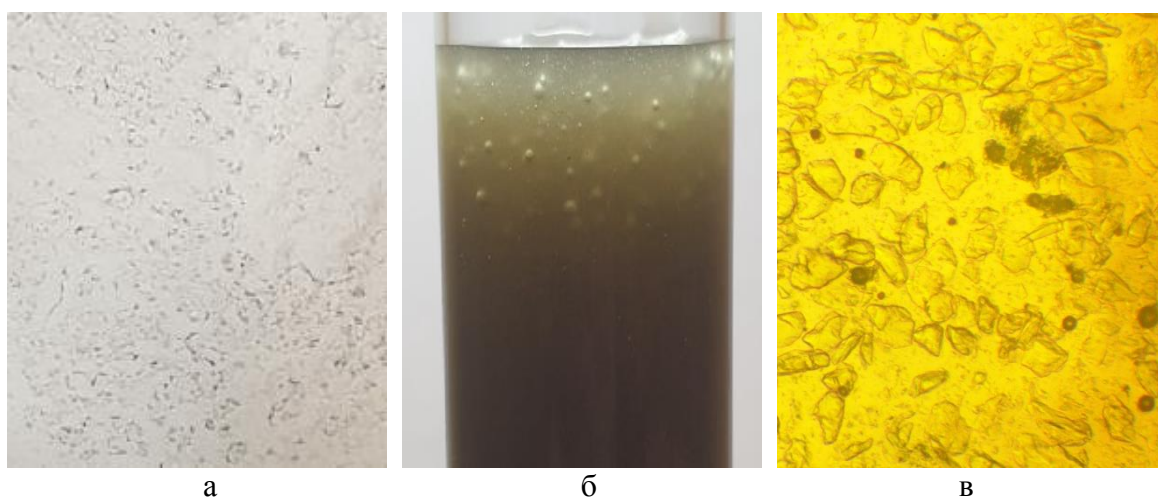


Рисунок 2 – Внешний вид материала.
 а – мелкодисперсный наполнитель; б – композиционный материал после смешения;
 в – структура композиционного материала под микроскопом

В течение первых 48 часов на поверхности системы на всех типах композиционных составов образовывается отслоение чистого фотополимерного материала общей высотой менее 1 мм, пузыри воздуха удаляются из системы, аэрации не наблюдается. В результате проведения оптического наблюдения сроком в 121 день (4 месяца) оседания наполнителя не выявлено, однако отслоение чистого материала на поверхности возросло до 1,4 мм.

Исследование композиционного состава под микроскопом во все периоды наблюдения не позволяет выявить видимые изменения в структуре. Равномерность распределения частиц в жидкой матрице остается неизменной за счет высокой вязкости и сил межфазного взаимодействия.

Наблюдение дна емкостей через просвет позволяет сделать вывод об отсутствии видимого осадка в композиции. Усредненные результаты наблюдения представлены в таблице 1.

Срок жизни жидких фотополимерных материалов, применяемых в лазерной стереолитографии, варьируется в диапазоне от 6 месяцев до 2 лет. У отвержденной массы, при исключении попадания света и влаги, срок жизни может повышаться в несколько раз. Таким образом, сохранение измельченного сырья в сухом виде имеет ряд преимуществ, над готовой композицией, однако производство готовых составов также повышает экологическую эффективность метода.

Таблица 1 – Результаты оптического наблюдения композиционного состава

Размер наполнителя, мкм	Содержание наполнителя, %	Высота отслоения чистого материала со временем, мм						
		24 ч.	96 ч.	6 сут.	14 сут.	32 сут.	94 сут.	121 сут.
20	5	0,94	1,03	1,16	1,23	1,29	1,34	1,36
	10	0,95	1,03	1,16	1,26	1,32	1,36	1,37
	20	0,95	1,04	1,17	1,27	1,32	1,37	1,38
	30	0,96	1,04	1,18	1,29	1,31	1,35	1,39
	50	0,96	1,05	1,19	1,29	1,33	1,38	1,39
35	5	0,95	1,04	1,18	1,23	1,31	1,35	1,36
	10	0,96	1,04	1,20	1,26	1,29	1,37	1,38
	20	0,96	1,05	1,21	1,29	1,34	1,37	1,39
	30	0,97	1,06	1,23	1,30	1,33	1,38	1,39
	50	0,97	1,06	1,24	1,32	1,36	1,39	1,4
55	5	0,96	1,07	1,23	1,26	1,32	1,36	1,38
	10	0,97	1,07	1,26	1,27	1,34	1,37	1,38
	20	0,97	1,08	1,26	1,29	1,35	1,39	1,39
	30	0,98	1,09	1,28	1,34	1,35	1,38	1,39
	50	1,00	1,09	1,28	1,36	1,38	1,39	1,4

Полученные в результате исследования данные позволяют говорить о возможности внедрения методики переработки и вторичного использования отходов лазерной стереолитографии с целью повышения экологической эффективности процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джейкобс П. Ф. Быстрое прототипирование и производство : основы стереолитографии / П. Ф. Джейкобс. – Нью Йорк, 1992. – 434 с
2. Ходер В. Б. Анализ эффективности переработки термореактивных отходов SLA-печати механическим измельчением / В. Б. Ходер [и др.] // Технология органических веществ : материалы 86-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). – Минск : БГТУ, 2022. – 180–182 с.