

В.Б. Ходер, магистрант;  
В.И. Козловский, канд. техн. наук, ст. преп.;  
Д.Н. Боровский, канд. техн. наук, доц. (БГТУ, г. Минск)

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ОТХОДОВ SLA-ПЕЧАТИ МЕХАНИЧЕСКИМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ**

Современный сектор промышленности при внедрении модели замкнутого цикла с вторичным использованием материальных ресурсов сталкивается с многочисленными проблемами методов переработки материалов. В частности, ярко выражена проблематика наладки цикличности материальных потоков при внедрении инновационных и мелкогабаритных методов производства, таких как трехмерная печать. Основной причиной является недостаток исследований в области рециклинга применяемых материалов.

Высокую популярность набирает метод лазерной стереолитографии (SLA). Основным материалом технологии являются фотополимерные смолы – термореактивные полимерные материалы, процесс сшивки которых, активизируется под действием ультрафиолетового или видимого излучения. Отверждение фотополимера необратимый процесс, что говорит о невозможности перевода сшитой структуры в исходное жидкое состояние. Структура конечного материала ограничивает рециклинг только механическими методами.

Одним из методов рециклинга отвержденных фотополимерных смол, предлагается получение мелкодисперсных частиц механическим измельчением и дальнейшее применение в качестве наполнителя. Важным фактором при оценке возможности рециклинга материала является обоснованный выбор метода и технологического маршрута переработки, а также оценка влияния различных технологических параметров измельчения на конечный продукт.

Целью исследования является оценка возможности и эффективности переработки термореактивных отходов SLA-печати методами диспергирования.

Объект исследования – отходы стандартной фотополимерной смолы Clear Resin компании Formlabs: поддерживающе структуры, занимающие до 60% материальных ресурсов конечных изделий или бракованные и отработанные образцы изделий.

Диспергированием твердых тел называют процессы уменьшения размеров исходного продукта в результате механического воздействия на материал – дробление или измельчение. Процесс дробления

производится на дробилках, в результате получают продукты преимущественно размером до 5–10 мм. При измельчении применяются мельницы различного типа, а материал на выходе, как правило, имеет размер фракции менее 5 мм [1]. Для получения частиц мелкой фракции используют ступенчатое измельчение, число стадий которого может доходить до 5 и более, в зависимости от применяемой технологии и требований к конечному размеру частиц.

Применяемые методы дробления и измельчения определяются характером поведения полимерного материала. Хрупкие материалы измельчаются раздавливанием, ударом и срезом, пластичные и эластичные – материалы лучше измельчаются срезом и истиранием. Однако чаще применяются смешанные методы измельчения [1].

В качестве показателей эффективности процесса помола применяют степень измельчения исходного сырья до необходимой фракции, определяемую как процентное отношение массы измельченного материала конкретной фракции к исходной массе.

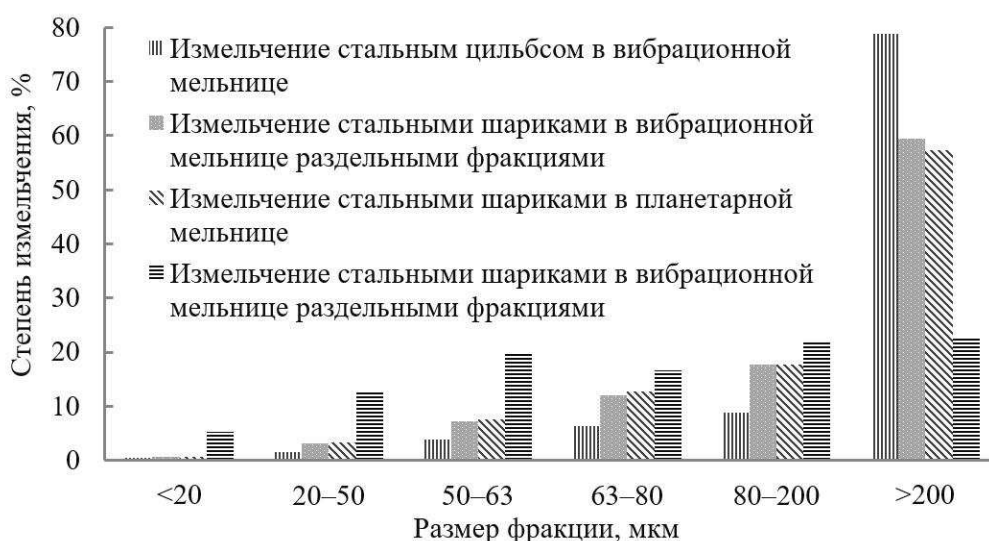
Дробление полностью отвержденного материала производилось на крестовой ударной мельнице Retsh SK 100. При первичном дроблении материал ведет себя как абсолютно хрупкий, разрушается со сколами, однако при уменьшении размера частиц до 1,5–2 мм и менее проявляет пластичные свойства и в дальнейшем не измельчается.

На второй стадии производился помол с использованием истирающего воздействия на вибрационной и планетарной мельницах. Первично истирание производилось на вибрационной мельнице с использованием стального цельпесца в качестве мелющего тела в течение 2 минут. Выход продукта с размером фракции менее 80 мкм составлял менее 10%, что является малоэффективным.

Для повышения производительности мелющие тела заменяются на стальные шарики, а измельчение проводится в планетарной мельнице. Данное комбинирование позволяет совместить удар и истирание в размольных барабанах при высокочастотных колебаниях корпуса. Выход продукта с размером фракции в диапазоне 50–80 мкм составил не более 25%, что также требует повторения циклов измельчения. Многочисленное истирание приводит к активному нагреву материала и помольной машины периодического типа, а также повышения общего времени измельчения продукта, понижает эффективность процесса. В связи с этим в дальнейшем применялась вибрационная мельница, незначительно понижающая выход продукта, нагрев в которой происходит менее интенсивно.

Второй из причин низкой эффективности метода является накопление статичной энергии материалом при нагреве. Частицы

мелкой фракции притягиваются к более крупным, покрывая их поверхность, что отрицательно влияет на процесс истирания и активно повышает температуру материала. Кроме того, высокая статичность мелкодисперсного материала не позволяет дальнейшее разделение фракции ситовым методом, из-за чего процесс необходимо останавливать на несколько часов. Данный эффект визуально наблюдается при просеве на ситах размером более 80 мкм. Практическим методом снижения нагрева материала и как следствие снижением его электростатичности является разделение материала по фракциям при измельчении и просеве. Результаты проведенного исследования представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Зависимость степени измельчения материала от метода измельчения**

Таким образом, при измельчении термореактивных отходов для получения частиц с требуемым размером частиц 50–63 мкм наиболее эффективно применять метод измельчения стальными шариками с предварительным разделением по фракциям. Однако для получения порошка больших фракций разделение не требуется. Стоит отметить, что для получения мелкодисперсных порошков рекомендуется применять методы, повышающие хрупкость материала – охлаждение в процессе измельчения или криогенная заморозка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. I – С.-Пб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 848 с.