

сократить потери возможно методами совмещения рабочих операций, рекуперации энергии, использованием параллельных рабочих органов.

Совмещения рабочих операций во времени и пространстве – реализация двух и более процессов в одном рабочем пространстве и в одно время. Это позволяет, во-первых, сократить совокупную продолжительность технологических операций, сокращая время  $t_{x.x.}$ , во-вторых, уменьшить количество необходимого оборудования, упростить технологическую схему. Однако технологический процесс не всегда позволяет свести  $t_{x.x.}$  к 0.

Системы рекуперации энергии разделяют на электрические и механические.

Электрические системы рекуперации – это техника, которая позволяет на короткое время превратить электромотор в генератор энергии, заряжающий аккумулятор или подающий питание в сеть от вращения рабочих органов. Тот же приём применяется в трамваях и электричках, в метрополитене, а также в современных электрокарах. Этот электротранспорт немного дороже моделей без рекуперации, но запас хода существенно больше. Хорошо себя зарекомендовал этот метод при использовании в лифтах и другой подъемной технике. Однако если время цикла мало и не имеет смысла останавливать электродвигатель применение электрической рекуперации не целесообразно.

Системы рекуперации кинетической энергии представляют собой применение маховиков или пружин, которые играют роль аккумуляторов. Они могут работать при частых изменениях нагрузки. Однако на практике используются для уменьшения рывков в работе оборудования, поскольку имеют низкий коэффициент полезного действия.

Схема с использованием параллельных рабочих органов – метод, суть которого, заключается в проектировании движущихся частей машины с совмещением холостых и рабочих ходов. Это позволяет свести время холостого хода, на валу двигателя, до нуля, при любой длительности цикла. Однако применение на практике усложняет проектирование оборудования, и его конструкцию.

**Заключение.** В результате аналитического обзора определено, что потери на холостом ходу электродвигателя могут составлять до 90% номинальной мощности. Поэтому при проектировании машин нужно стремиться к продолжительному режиму на валу электродвигателя. Рассмотрено несколько методов уменьшения потерь: совмещение рабочих операций, рекуперация энергии, использованием параллельных рабочих органов. На практике необходимо использовать их в зависимости от поставленных технологических задач, комбинируя по возможности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Острецов В.Н. Электропривод и электрооборудование — М.: Юрайт, 2019. – 239 с.;
2. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию – 3-е изд., испр., - М., Высш. Шк., 2002. – 255 с.;
3. Насонкин Г.А. Введение в эволюционное экспериментально-статистическое моделирование технологического процесса. — К.: Техніка, 2002. — 68 с.
4. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. - К.: Наукова думка, 2002. – 660 с.
5. Фираго Б.И., Палявчик Л.Б. Теория Электропривода – Техноперспектива 2007. – 527 с.

УДК 662.668

#### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ 3D-ПЕЧАТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЯ

*А. А. Третьякова, канд. техн. наук, доцент А. И. Ермаков, ФММП БНТУ, г. Минск*

*Резюме - в данной статье будет рассмотрен вопрос о варьировании режимов печати, в частности температурных показателей, которые влияют на конечный продукт 3d-печати. Данная тема актуальна, т.к. несёт практический опыт и благодаря этому, при печати PLA-пластиком, больше не возникнет вопрос: «Какую выставить температуру при печати, чтобы максимально сэкономить пластик, время и деньги?».*

*Ключевые слова: PLA-пластик, экология, машиностроительное производство, 3d-принтер.*

**Введение.** Актуальность 3D-печати растёт изо дня в день во всём мире и в нашей стране. Широко используют трёхмерную печать в промышленности и машиностроении. Создаются модели будущей продукции, которые используются в экспериментах для выявления технических характеристик, в презентациях для широкой аудитории. С помощью аддитивных технологий налаживаются целые линии по выпуску деталей со сложной геометрией.

**Основная часть.** В сфере 3D-печати одним из основных материалов является полимолочная кислота (PLA). PLA имеет низкую температуру плавления, он не деформируется, что позволяет обойтись без нагревательного стола. Наряду с ABS (акрилонитрилбутадиенстирол, АБС), PLA является базовым материалом для производства «экзотического» пластика, который имеет проводящие свойства или светится в темноте. Пластик могут пропитываться частицами дерева или металла, что кардинально меняет свойства [1].

Полилактид (ПЛА, PLA) — биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота.

Важной отличительной особенностью такого пластика является то, что он создан на основе растительного сырья и имеет свойство разлагаться, что дает ему преимущество по сравнению с другими пластиками. Длительность разрушения PLA-пластика в зависимости от температуры и влажности воздуха представлены в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Время разрушения PLA-пластика в зависимости от условий окружающей среды

Температура, °С	Влажность воздуха, %	Начальная фрагментация	Полное разрушение
4	100	5,3 года	10,2 года
25	20	2,5 года	4,8 года
25	80	2 года	3,1 года
40	80	5,1 мес.	10 мес.
60	20	1 мес.	2,5 мес.
60	80	15 дней	2 мес.

При утилизации чистый полилактид в промышленном компосте (при этом влажность составляет 80% , температура воздуха 55-70 °С) разлагается за один месяц. Но при средних температурах и нормальной влажности воздуха, которые характерны для бытового и рабочего окружения, хранение такого пластика может быть ограничено до 2-3 лет.

Стадии изготовления филамента из PLA-пластика для 3D-печати представлены на рисунке 1.

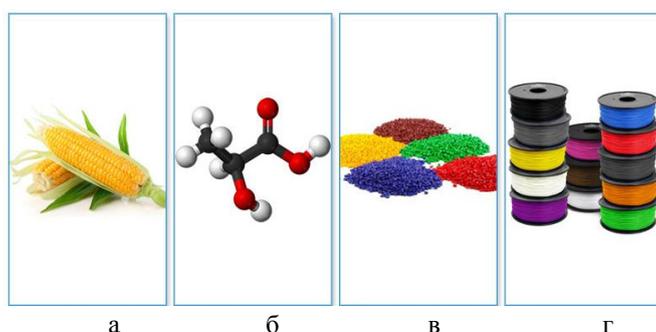


Рисунок 1 – Стадии превращения из кукурузы в нити для 3D-принтера.  
а – кукуруза; б – молочная кислота; в – PLA-гранулы; г – нити (филамент) 3D-печать

Применение технологии 3D-печати PLA-пластиком в промышленном масштабе ограничено, не только применением дорогостоящего оборудования, которое требует грамотного обслуживания и эксплуатации, но недостатком информации о механических свойствах получаемых изделий [4].

На механические характеристики влияет множество параметров: форма и коэффициент заполнения, толщина сопла экструдера, скорость печати, температуры экструдера и столика. Поэтому важным этапом при печати PLA-пластиком является правильное варьирование режимов печати.

По данным исследования оптимальный процент заполнения опытных образцов составляет 20%, этого достаточно для обеспечения требуемой прочности. Процент заполнения и толщина стенок влияют на прочность, массу и, как следствие, на стоимость 3D-печатной модели. [5]

Основными показателями при оценке механических характеристик изделия являются: максимальная нагрузка, максимальное напряжение, зона пластичности и предел упругости. Для выявления комплексного показателя желательности, определяемого как оптимальное соотношение механических характеристик, времени печати и количества затрачиваемого пластика, были проведены испытания на разрыв и изгиб.

При проведении испытаний на разрыв, можно сделать вывод, что образцы, напечатанные на ребре, показали самый высокий результат при проведении испытания на разрыв, но при печати на ребре было затрачено самое большое количество пластика [5]. Время печати одного образца на разрыв составило 39 минут, что на 10 минут больше треугольной формы и сот. Поэтому применение данной формы является слишком затратным для внедрения в производство.

Треугольная форма показала высокие значения при проведении испытаний разрыв. Однако, при одинаковом времени печати с «Сотами», на треугольную форму было затрачено больше пластика, а значение напряжения на порядок меньше.

«Соты» – являются лучшим вариантом для увеличения прочности модели.

При проведении испытаний на изгиб так же, как при испытаниях на разрыв, образцы, напечатанные на ребре, показали самый высокий результат при проведении испытаний на изгиб. Тем не менее следует отметить, что результаты исследования справедливы только для нагрузки, приложенной перпендикулярно направлению

волокон, в случае же приложения нагрузки вдоль волокна прочностные характеристики значительно снижаются, то есть существует высокая зависимость характеристик между направлением нагрузки и волокна.

Так же научный интерес представили механические характеристики образцов изготовленных при критических температурах печати, а именно температуре сопла (максимальная и минимальная температуры).

Для проведения испытаний была выбрана определённая форма заполнения ячеек, показавшая себя наилучшим образом в предыдущих испытаниях, а именно «Соты».

Изготовление образцов осуществлялась при постоянной максимальной температуре сопла – 220°C и минимальная температура сопла 210°C. Скорость печати при этом составила 60 мм/с

Для более подробного анализа данных были построены регрессионные зависимости (рисунок 2, рисунок 3, рисунок 4, рисунок 5) изменения нагрузки, напряжения, пластической деформации, зоны пластичности от температуры сопла, при постоянной форме печати – «Соты», температура нагревательного столика – 55 °С, 20% заполнения.

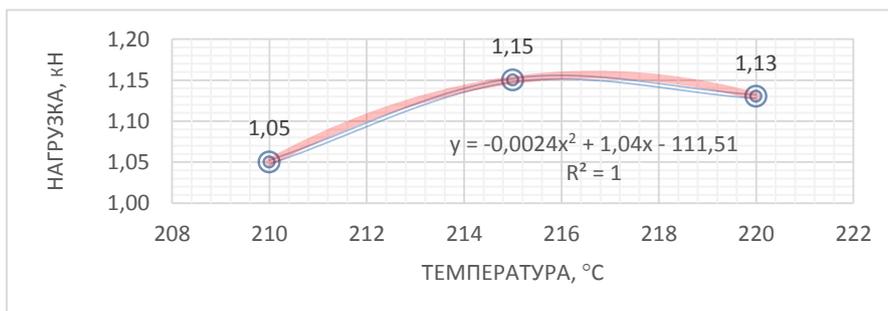


Рисунок 2 – График изменения нагрузки (разрыв)

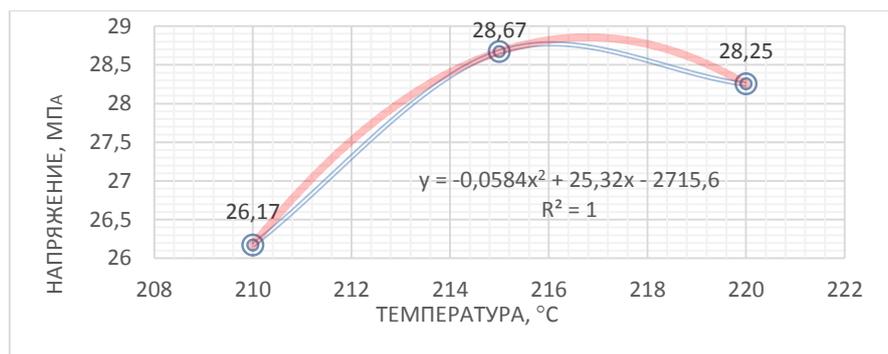


Рисунок 3 – График изменения напряжения (разрыв)

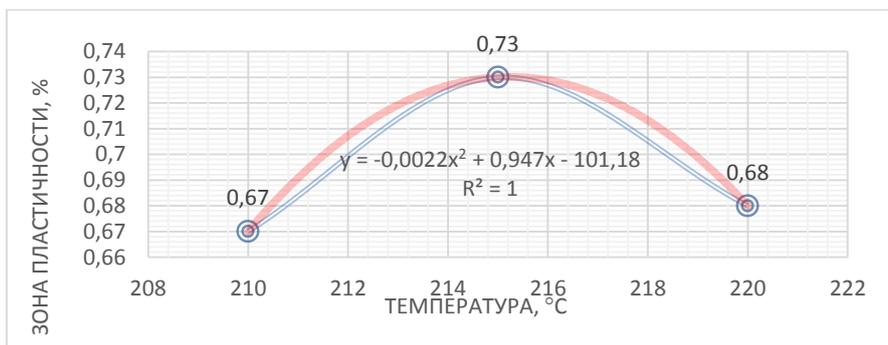


Рисунок 4 – График пластической деформации (разрыв)

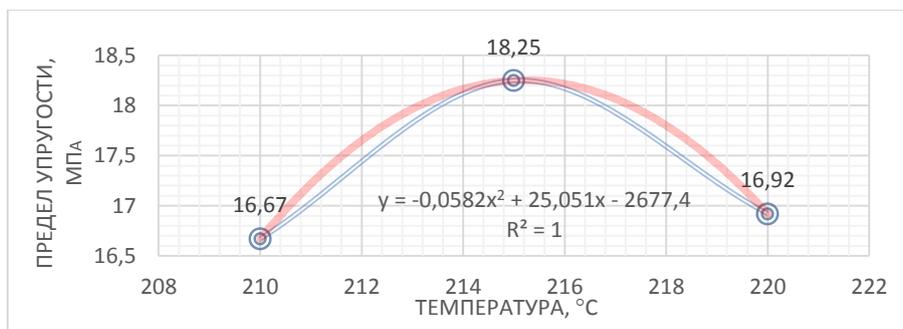


Рисунок 5 – График изменения предела упругости (разрыв)

Проанализировав данные исследования, можно сделать заключение о том, что влияние температурных режимов печати на прочность изделий имеет не линейный характер, графическая зависимость имеет выраженный экстремум.

**Заключение.** Опытным путём доказано, что шестигранное заполнение или «Соты», позволит сэкономить энергию, время и материал, а также обеспечит высокую прочность изделия.

Также из вышесказанного следует, что нет необходимости в печати при критических температурах, а лучше всего применять усреднённые рекомендуемые температурные режимы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пластики для печати, всё что нужно знать о материалах // Всё для 3D-принтеров [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/raznovidnosti-plastikov-3D-pechati/>. – Дата доступа: 21.02.2021.
2. Ермаков, А. И. Утилизация тары и упаковки: учеб.-метод. пособие / А. И. Ермаков. – Минск : БНТУ, 2017. – 194 с.
3. Ермаков, А.И. Применение 3D-печати в кондитерском производстве / А.И. Ермаков, С.В. Чайко / НАУКА – ОБРАЗОВАНИЮ, ПРОИЗВОДСТВУ, ЭКОНОМИКЕ: Материалы 15-й Международной научно-технической конференции (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) в 4 томах, Минск, май 2017г. / БНТУ. – Минск, 2017. – Том 4 – С.503
4. Ермаков, А.И. Разработка 3d- принтера для образовательных учреждений / А.И. Ермаков, В.В. Книга, Е.П. Мелешеня, А.А. Третьякова // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сборник статей III международной научно-практической конференции, Минск, 23–24 марта 2017 г. / БГАТУ; редкол.: В.Я. Груданов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 426–428.
5. Савченя, А. А. Исследование влияния технологических параметров 3D-печати PLA пластиком на механические характеристики изделий / А. А. Савченя, А. И. Ермаков // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий : материалы 16-го Международного научного семинара, проводимого в рамках 18-ой Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» 26 марта 2020 года, Минск, Республика Беларусь. – Минск : Право и экономика, 2020. – С. 231-232.

УДК 621.793

#### ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

доктор техн. наук **Н. М. Чигринова**, студентка гр. 10505117 **А. И. Кащенко**,  
ФММП БНТУ, г. Минск

*Резюме* - в статье проанализированы особенности существующих технологий повышения износостойкости режущих поверхностей.

*Ключевые слова:* износ, металлообрабатывающий инструмент, осаждение из газовой фазы, защитные покрытия.

**Введение.** В современном машиностроении для изготовления множества изделий применяется механическая обработка их поверхностей, в процессе которой возникает ряд факторов, существенно влияющих на работоспособность и долговечность режущего инструментария и, следовательно, на качество обрабатываемой поверхности: высокая температура в зоне контакта рабочего инструмента и заготовки, высокие твердость и прочность и низкая теплопроводность труднообрабатываемых материалов, большая химическая активность материалов изделия и инструмента и др. Минимизация перечисленных воздействий, как правило, обусловлена применением различных приемов, среди которых наиболее эффективными и экономичными являются износостойкие покрытия. Выбор и оптимизация методов создания таких покрытий, позволяющих продлить сроки безремонтной эксплуатации инструмента, обеспечив его требуемое качество и служебные характеристики, а