

*Е. А. Соболев**

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ
КОЛЕС-ПРОТОТИПОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ
FDM-ПЕЧАТИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПРИ РАЗНОЙ ОРИЕНТАЦИИ СЛОЕВ**

В отличие от металлических зубчатых колес, получаемых механической обработкой или литьем, полимерные колеса, изготовленные методом FDM, используются в качестве функциональных прототипов для малонагруженных передач (робототехника, бытовая техника).

* Работа выполнена под руководством доктора технических наук, профессора кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ «ПГТУ» М. В. Соколова.

Цель настоящей работы – не замена металла, а оценка пригодности различных пластиков для быстрого прототипирования зубчатых колес с управляемой анизотропией свойств.

Основная проблема FDM-печати зубчатых колес – анизотропия свойств, обусловленная послойным формированием. Механические характеристики существенно различаются вдоль и поперек направления укладки слоев. Для зубчатого колеса это проявляется в разной способности зубьев сопротивляться изгибной нагрузке в зависимости от того, как ориентирована деталь на столе принтера.

Цель работы – экспериментально оценить влияние ориентации печати и материала на прочность зуба для четырех пластиков (PLA, ABS, PETG, нейлон) и сравнить полученные прототипы на статическую изгибную прочность зуба с алюминиевым эталоном.

В качестве объектов исследования выбраны прямоугольные цилиндрические зубчатые колеса со следующими параметрами колеса: $m = 2$ мм, $z = 20$, $b = 10$ мм.

Печать: FDM, высота слоя 0,2 мм, 100% заполнение. Три ориентации: горизонтальная (0°), диагональная (45°), вертикальная (90°) – но в анализ взяты крайние (0° и 90°). Испытания: статический изгиб зуба. Эталон – колесо из алюминиевого сплава, изготовленное традиционным методом зубофрезерования. Алюминиевое колесо послужило эталоном для оценки абсолютной прочности.

Испытания проводились на универсальной разрывной машине с пределом нагрузки 10 кН. Нагрузка прикладывалась к одному из зубьев колеса через жесткий ролик до момента разрушения (для пластиков) или до появления остаточной деформации (для алюминия). Ключевой фиксируемый параметр – максимальная разрушающая нагрузка F_{\max} (Н). Дополнительно проводился визуальный и микроскопический анализ характера разрушения пластиковых образцов.

Результаты испытаний на статический изгиб зуба представлены в табл. 1. Для каждого материала указаны средние значения разрушающей нагрузки для трех типов ориентаций. Для алюминия приведено справочное расчетное значение на основе предела текучести.

Из данных таблицы видно, что для всех исследованных пластиков горизонтальная ориентация печати (0°) обеспечивает наивысшую прочность. Вертикальная ориентация (90°) приводит к резкому падению нагрузки из-за разрушения по межслойным границам.

Сравнение с алюминиевым эталоном: наилучший пластик (нейлон, 400 Н) уступает алюминию (≈ 2500 Н) примерно в 6 раз. При этом дешевый PLA в 8 раз слабее алюминия, а PLA при вертикальной печати – в 70 раз. Это наглядно демонстрирует границы применимости полимерных прототипов.

1. Средняя разрушающая нагрузка для исследуемых материалов

Материал	0° Н	45° Н	90° Н	Характер разрушения (0°/45°/90°)
PLA	320	210	35	разрыв/смеш./расслоение
ABS	260	180	80	разрыв/смеш./расслоение
PETG	290	210	60	разрыв/смеш./расслоение
Нейлон	400	310	140	разрыв/смеш./расслоение
Ал. Д16Т	≈ 2500*	–	–	–

* Расчетное значение изгибного напряжения у ножки зуба для колеса модуля 2 мм при пределе текучести алюминия 350 МПа.

Максимальная прочность при 0° объясняется тем, что непрерывные волокна пластика проходят вдоль зуба, воспринимая нагрузку. При 90° нагрузка действует поперек слоев, вызывая расслоение – адгезия между слоями значительно ниже прочности материала.

Как указывают В. М. Медунецкий с соавторами, «основными преимуществами полимерных зубчатых колес являются снижение массы, шумности и стоимости изготовления, однако область их применения ограничена передачами малой и средней мощности» [1]. Полученные данные подтверждают это: замена алюминия на пластик возможна только при снижении нагрузки в 6 и более раз.

Рекомендации по выбору материала:

PLA: низкая стоимость и простота печати и самая низкая прочность и хрупкость. Идеален для первичной проверки геометрии;

ABS: хорошая ударная вязкость и термостойкость, но требует закрытой камеры при печати. Подходит для функциональных прототипов в робототехнике;

PETG: технологический компромисс, сочетая простоту печати (как у PLA) и улучшенные механические свойства, близкие к ABS;

Нейлон: лучшая прочность среди пластиков, но сложность печати и гигроскопичность делают его выбор оправданным только для ответственных прототипов.

Рекомендация: для функциональных прототипов – горизонтальная печать (0°) и выбор пластика по нагрузке: PLA (до 50 Н), PETG/ABS (до 100 Н), нейлон (до 200 Н). При нагрузках >500 Н – только металл.

Заключение

1. Ориентация печати – критический фактор. Разница в нагрузке между 0 и 90° – 3 – 9 раз.
2. Лучший пластик – нейлон (400 Н при 0°), худший при вертикальной печати – PLA (35 Н).
3. Характер разрушения: при 0° – разрыв волокон, при 90° – расслоение.
4. Пластики уступают алюминию в 6 раз, пригодны только для прототипов в малонагруженных узлах.
5. Рекомендована горизонтальная печать (0°) для всех функциональных прототипов.

Список литературы

1. Использование полимерных композиционных материалов в цилиндрических зубчатых передачах / В. М. Медунецкий, М. В. Абрамчук, С. Ю. Перепелкина и др. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2024. – Т. 67, № 10. – С. 878 – 886.

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы
в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ»*