

Литература

1. КОМПАС-3D V17 : рук. пользователя / АСКОН – Системы проектирования. – СПб. : ОАО «Аскон – Системы проектирования», 2017. – 2920 с.
2. Kompas Flow. Система гидродинамического и термодинамического экспресс-анализа для КОМПАС-3D : рук. пользователя / АСКОН – Системы проектирования. – СПб. : ОАО «Аскон – Системы проектирования», 2018. – 2920 с.
3. Распределители гидравлические секционные типа РАМ-20/3 : каталог изделий Гомел. ОАО «ГСКТБ ГА». – Гомель : ОАО «ГСКТБ ГА», 2010.

УДК 004.9

**ВЛИЯНИЕ ЦВЕТА PLA НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ,  
НАПЕЧАТАННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ**

**А. А. Михальченко**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет транспорта», г. Гомель*

*В последнее время количество принтеров для потребителей стремительно увеличивается, и они составляют большую часть рынка 3D-принтеров. Среди них преобладают принтеры с открытым исходным кодом RepRap. Эти принтеры имеют потенциал для использования в более масштабном производстве. Недавнее исследование показало, что детали, напечатанные на принтере с технологией RepRap, могут соответствовать и даже превосходить по производительности и прочности на разрыв при использовании тех же полимеров коммерческие 3D-принтеры, использующие запатентованную технологию FDM. Однако прочность на разрыв набора образцов, изготовленных на принтерах с технологией RepRap, колеблется. Чтобы объяснить эти колебания, в данном исследовании определяется влияние цвета и температуры обработки на свойства материала Lulzbot TAZ, полученного из PLA пяти различных цветов.*

**Ключевые слова:** механические свойства; распределенное производство; RepRap; цвет пластика; кристалличность.

**THE EFFECT OF PLA COLOR ON THE PROPERTIES  
OF MATERIALS OF PRODUCTS PRINTED ON A 3D PRINTER**

**A. A. Mikhalchenko**

*Educational Institution “Belarusian State University of Transport”, Gomel*

*Recently, the number of printers for consumers has been rapidly increasing, and they make up a large part of the 3D printer market. RepRap open source printers are among them. These printers have the potential to be used in larger scale production. A recent study has shown that the details printed on a printer with RepRap technology can match and even exceed in performance and tensile strength when using the same polymers, commercial 3D printers using the patented FDM technology. However, the tensile strength of a set of samples made on printers with RepRap technology varies. To explain these fluctuations, this study determines the effect of color and processing temperature on the properties of the Lulzbot TAZ material obtained from PLA of five different colors of colors.*

**Keywords:** mechanical properties; distributed production; RepRap; plastic color; crystallinity.

В настоящее время на рынке представлено множество различных материалов для трехмерной печати, включая ABS, нейлон, поликарбонат, полиэтилен высокой плотности, высокопрочный полистирол, PLA (полилактид) и др. PLA стал одним из фаворитов среди пользователей потребительских 3D-принтеров. PLA имеет отно-

нительно низкую температуру плавления (150–160 °C), поэтому для печати из этого материала требуется меньше энергии, что также дает преимущества для применения в автономных сетях в развивающихся странах. Современные исследования описывают влияние ориентации слоев на свойства при использовании порошковых принтеров, а использование принтеров с методом послойного наплавления (FDM) показало зависимость прочности от различных типов рисунков заполнения и внутренних структур [1]. Также на коммерческих принтерах была продемонстрирована разница в адгезии слоев при печати деталей с использованием различных параметров изготовления, включая температуру [1]. Недавно было проведено исследование механических свойств деталей, которое показало, что образцы RepRap могут соответствовать и даже превосходить коммерческие 3D-принтеры, использующие запатентованный FDM, в плане прочности на разрыв с теми же полимерами [2]. Предварительная оценка результатов показала, что некоторые различия в прочности могут быть связаны с цветом нити. Уже было доказано, что полимеры содержат различные степени кристалличности в зависимости от обработки и температуры [2].

**Методы и материалы.** Тестовые образцы были напечатаны на 3D-принтере Lulzbot TAZ 4 с открытым исходным кодом с использованием PLA нити, диаметром 3 мм, от Lulzbot следующих цветов: прозрачный, белый, черный, серебристый и синий. Все детали были напечатаны с идентичными параметрами при температуре 190 °C – для экструдера и 60 °C – для платформы сборки. Образцы печатались со 100%-м заполнением и чередующимся рисунком заполнения. Кроме того, белые образцы печатались при различной температуре экструдера: от 190 до 215 °C. Затем напечатанные образцы подвергались испытаниям на растяжение. В испытаниях на растяжение и испытаниях на разрыв использовалось по десять образцов различных цветов, напечатанных при 190 °C, и по пять образцов, напечатанных при повышенной температуре. Для проведения данного испытания использовалась машина серии ProLine с программным обеспечением фирмы «ZwickRoell». Технические характеристики: диапазон измерения сил (нагрузок) – от 5 до 10000 Н (от 0,5 до 1000,0 кгс); погрешность  $\pm 1,0\%$ . На рис. 1 представлены образцы, прошедшие испытания на растяжение и на разрыв, изготовленные из PLA-пластика белого цвета при температуре 190 °C.

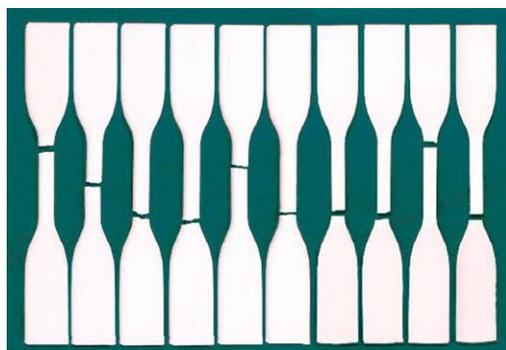


Рис. 1. Образцы из PLA-пластика белого цвета, изготовленные при температуре 190 °C, после испытаний на разрыв и растяжение

**Результаты.** Результаты исследований показывают, что процентная кристалличность деталей зависит от цвета, как показано в таблице. Прозрачный PLA (без добавления красителя) содержит самый низкий процент кристаллических областей – 0,93 %. Напротив, белый материал содержит наибольший процент кристаллических областей – 5,05 %. В таблице показаны предел прочности при растяжении, деформация при данном пределе прочности при растяжении и средние значения процента кристалличности для каждого цвета вместе с соответствующими ошибками.

**Предел прочности при растяжении, максимальная деформация и процент кристалличности в зависимости от цвета PLA**

Цвет	Предельная прочность, МПа	Предел текучести, МПа	Максимальное напряжение, %	Кристалличность, %
Прозрачный	57,16 ± 0,35	52,47 ± 0,35	2,35 ± 0,05	0,93 ± 0,06
Черный	52,81 ± 1,18	49,23 ± 1,18	2,02 ± 0,08	2,62 ± 0,09
Серый	50,84 ± 0,23	46,08 ± 0,23	1,98 ± 0,04	4,79 ± 0,10
Синий	54,11 ± 0,30	50,10 ± 0,30	2,13 ± 0,02	4,85 ± 0,15
Белый	53,97 ± 0,26	50,51 ± 0,26	2,22 ± 0,04	5,05 ± 0,18

**Обсуждение.** Представленные данные подтверждают утверждение о том, что 3D-принтеры RepRap могут производить детали с равной или большей прочностью на растяжение, чем детали, полученные с помощью 3D-принтеров с технологией FDM. Стоит отметить, что все образцы имели достаточно постоянный модуль Юнга 2,78 ГПа (+/- 0,35), что находится в приемлемом диапазоне для PLA [3]. Каждый из представленных цветов при печати при температуре 190 °C имел различную прочность на разрыв и процент кристалличности. Это показывает, что для достижения желаемых свойств материала может быть принято решение о выборе цвета, с которым печатается деталь. Также показана относительная температурная зависимость прочности материала на разрыв и опять же процентной кристалличности. В то время как прочность на разрыв увеличивается с температурой, кристалличность возрастает от 190 °C до максимума при 210 °C и обратно снижается до более низкого значения при 215 °C. Используя эти данные, можно предположить, что может существовать критическая температура процентной кристалличности, присутствующей в данном материале. Это соответствует традиционной экструзии полимеров PLA, поскольку хорошо известно, что кристаллизация PLA может быть инициирована отжигом при температурах, выше температуры стеклования, но ниже температуры плавления для улучшения их термической стабильности [1, 2]. Поскольку сырой PLA имеет 0–1 % кристалличности [3] и представленные здесь данные соответствуют этому диапазону, добавление других красителей, усилителей или других агентов должно быть фактором, способствующим различным процентам кристалличности, наблюдаемым в окрашенных образцах. Различия в прочности при растяжении можно объяснить поведением самого материала. Когда кристалличность очень низкая, прочность зависит от самого материала, что приводит к высокой прочности на разрыв. Кристалличность увеличивается по мере увеличения температуры печати до достижения максимального значения, в данном случае – 210 °C, и снижается по мере увеличения температуры выше максимальной. Прочность на разрыв увеличивалась при каждой температуре, кроме 200 °C, что, возможно, связано с преимущественной

ориентацией кристаллических зерен перпендикулярно направлению, в котором образцы растягивались при этой температуре. На рис. 4 и 5 показана эта потенциальная зависимость, где при температуре 200 °С наблюдается минимальное значение как прочности, так и процентной кристалличности. При рассмотрении температурной зависимости прочности материала тенденция изменения прочности при растяжении в зависимости от кристалличности не прослеживается. После печати материала при температуре 215 °С прочность на разрыв становится выше, но процент кристалличности ниже критической кристалличности при 210 °С. Из-за слоистой природы процесса 3D-печати более высокая температура печати может дать различным слоям больше времени для сцепления друг с другом перед охлаждением до температуры стеклования.

Согласно результатам данного исследования для каждого цвета существует критическая температура печати для оптимизации кристалличности, исходя из результатов для белого материала. В будущем необходимо исследовать влияние температуры печати в зависимости от других цветов, чтобы создать матрицу свойств, позволяющую провести более полный выбор материала.

#### Литература

1. Polymer Recycling Codes for Distributed Manufacturing with 3D printers / E. J. Hunt [et al.] // Resources, Conservation and Recycling. – 2015. – Vol. 97. – P. 24–30.
2. Mobile Open-Source Solar-Powered 3D Printers for Distributed Manufacturing in Off-Grid Communities / D. L. King [et al.] // Challenges in Sustainability . – 2014. – N 2 (1). – P. 18–27.
3. Groenendyk, M. 3D printing and scanning at the Dalhousie University Libraries: a pilot project / M. Groenendyk, R. Gallant // Libr. Hi Tech. – 2013. – N 31 (1). – P. 34–41.

УДК 62-82-112.6

## **РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МОНТАЖНОГО КОРПУСА ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ МАШИН**

**В. В. Пинчук**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**А. А. Гинзбург**

*Открытое акционерное общество «Гомельское специальное конструкторско-техническое бюро гидроннеавтоматики», Республика Беларусь*

**О. К. Гурбан**

*Учреждение образования «Гомельский государственный профессионально-технический колледж электротехники», Республика Беларусь*

*Получены значения критерия оптимальности монтажного корпуса гидроблока управления машин, позволяющие выполнить параметрический синтез гидроблока управления с учетом условий эксплуатации машин и количества гидроаппаратов в гидросхеме привода.*

**Ключевые слова:** гидроблоки управления, технологические машины, гидроблоки управления, параметрический синтез.