

**Заключение.** В процессе магнитно-импульсной обработки происходит улучшение физико-механических показателей металла. В данном случае магнитное поле воздействует на заготовку не с целью ее деформации, а с целью улучшения физико-механических свойств. Магнитное поле нагревает заготовку; интенсивность вихревых токов, которые им создаются, растет в местах структурной неоднородности заготовки, а именно в местах, где есть дефекты кристаллической решетки или сторонние включения (коррозия, естественное старение, деформация). Под воздействием магнитных полей дефекты исправляются или выталкиваются. Магнитно-импульсная обработка металлов повышает такие показатели как стойкость, прочность и коррозионная защищенность.

#### Список цитируемых источников

1. *Жарский, И. М.* Технологические методы обеспечения надёжности деталей машин / И. М. Жарский, И. Л. Баршай, Н. А. Свидунович, Н. В. Спиридонов // Минск: Вышэйшая школа. — 2005. — 299 с.
2. *Алифанов, А. В.* Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов, А. В. Акулов, Ж. А. Попова, А. С. Демянчик // *Литье и металлургия*, 2012, №3. — с. 74-78.
3. *Алифанов А. В.* Влияние режимов упрочняющей магнитно-импульсной обработки на прочностные характеристики дереворежущих но-жей / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, А. С. Демянчик. — *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. «Промышленность. Прикладные науки»*. — 2012. — С.64.

УДК 539.383

Л. Л. Сотник, О. И. Наливко

*Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь*

### ИСПЫТАНИЯ НА СЖАТИЕ ОБРАЗЦОВ НАПЕЧАТАНЫХ С ПОМОЩЬЮ FDM ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНЫХ И УПРУГО-ПЛАСТИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ПРИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ

**Введение.** Моделирование методом послойного наплавления (англ. fuseddepositionmodeling, FDM) — аддитивная технология с каждым годом все больше и больше проникает в различные направления промышленности, в том числе и в машиностроение. Так как данная технология раньше использовалась в основном для элементов декора и частично для создания прототипов изделий, характеристики элементов получаемых при 3D печати изучены очень слабо или не рассматривались вообще. Поэтому для внедрения FDM технологий в машиностроение необходимо четкое понимание прочностных и упруго-пластических характеристик материала после 3D печати.

Целью работы является определение прочностных и упруго-пластических характеристик изделий полученных 3D печатью при различной степени заполнения изделий. Наблюдение за поведением образцов проводилось при сжатии элементов.

**Основная часть.** Технология FDM подразумевает создание трёхмерных объектов за счёт нанесения последовательных слоёв материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков [1].

При испытании на сжатие пластических материалов (пластиков, мягкой стали, меди и др.) из-за сильной деформации (сплющивания) удастся определить лишь предел текучести. Практически они не могут быть разрушены и исследуемые материалы получают значительную пластическую деформацию, обусловленную пластичностью материала. Это свойство материалов давать остаточные (пластические) деформации называется пластичностью. Пластичность — это положительное свойство материала. Она играет большую роль в обеспечении безопасности и надёжности материалов конструкций. Чем длительнее развитие пластических деформаций, тем больше предел несущей способности (начало пластического деформирования) отдален от предела прочности (фактического разрушения материала).

Различные варианты 3D принтеров и технология FDM позволяет регулировать различные параметры печати: температуру экструдера и стола, толщину слоя, скорость печати и обдув. В данной статье представлены исследования с варьированием одним параметром — величина заполнения. Заполнение сильно влияет на прочность детали. Использование различных вариантов заполнения это хорошее решение для декоративных изделий, так как увеличивается скорость печати и при этом уменьшается расход материала, но для нагруженных деталей в машиностроении такое решение нуждается в анализе.

Специально для испытаний напечатаны на FDM 3D принтере образцы в форме цилиндра с заполнением 100, 75 и 50 % (рисунок 1, а, в, д), температура экструдера — 200 °С, температура стола — 60 °С, толщина слоя — 0,1 мм, скорость печати — 60 мм / с, обдув — 100 %.

Размеры образцов представлены в таблице 1.



Рисунок 1 — Форма образцов: а — образцы до испытания заполнение 100 %; б — образцы после испытания заполнение 100 %; в — образцы до испытания заполнение 75 %; г — образцы после испытания заполнение 75 %; д — образцы до испытания заполнение 50 %; е — образцы после испытания заполнение 50 %

Т а б л и ц а 1 — Размеры и характеристики образцов из PLA пластика

Маркировка образца	$d$ , мм	$L$ , мм	$F_T$ , кН	$\sigma_T$ , МПа	$E$ , ГПа
PLA1	15,03	25,08	13,938	78,6	2,893
PLA2	15,02	25,02	13,424	75,8	2,825
PLA3	15,05	24,98	13,193	74,2	2,793
PLA4	14,96	24,93	13,633	77,6	2,925
PLA5	14,98	25,05	13,529	76,8	2,911
Среднее значение			13,543	76,6	2,87
PLA6	15,02	25,06	11,509	74,7	2,815
PLA7	15,03	25,01	11,139	72,2	2,796
PLA8	14,96	24,98	11,280	73,8	2,801
PLA9	14,99	24,99	11,356	74	2,756
PLA10	15,00	24,98	11,356	73,9	2,832
Среднее значение			11,328	73,72	2,8
PLA11	15,00	24,96	9,511	71,8	2,715
PLA12	15,03	24,94	9,696	72,9	2,786
PLA13	14,98	24,93	9,393	71,1	2,815
PLA14	14,99	24,95	9,366	70,8	2,823
PLA15	15,01	24,91	9,763	73,6	2,811
Среднее значение			9,546	72,04	2,79

Отличие в размерах образцов обусловлено усадкой материала после экструзии. Поскольку разные участки охлаждаются с различной скоростью, их размеры также могут отличаться, но это не оказывает существенного влияния на проведение эксперимента.

Также необходимо учесть, что детали, напечатанные при помощи FDM технологии, обладают анизотропией, обусловленной адгезией между слоями.

*Методика испытаний.* Для проведения испытаний на сжатие использовался универсальный пресс с пишущим механизмом. Образцы по очереди устанавливаются на нижнюю опорную плиту прессы. Верхняя опорная плита опускается при помощи винтового механизма, затем включается насос и при помощи гидравлического усилия происходило сжатие образцов. Испытания проводились при скорости сближения опорных плит 50 мкм / сек, в соответствии с ГОСТ 4651–2014 и ГОСТ 28840-90 [2, 3].

Испытанию на сжатие подвергается пластичный материал и по мере укорочения образец расширяется в поперечном направлении и приобретает характерную бочкообразную форму. При сильном сжатии такой материал плющится, но не разрушается или разрушается частично. Поэтому для очень пластичных материалов отсутствует понятие предела прочности при сжатии.

На первой стадии нагружения образцы работали упруго, стрелка силоизмерительного аппарата медленно поднималась вверх, что свидетельствовало о зоне упругих деформаций. При достижении текучести стрелка оставалась на месте или колебалась в небольших пределах, это говорит о наступлении стадии пластических деформаций. Далее стрелка медленно двигалась вверх, испытания прекращались при сжатии образца на 50 % первоначальной длины. На рисунке 1, б, г и е представлены образцы после силового нагружения, а на рисунке 2, а показаны диаграммы сжатия образцов (заполнение 100 %) полученная на универсальном прессе.

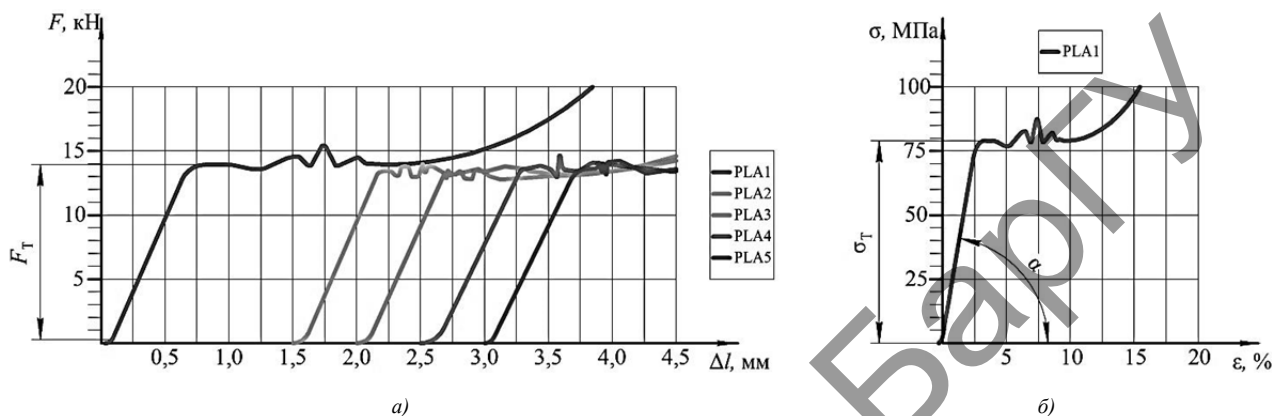


Рисунок 2 — Диаграммы сжатия образцов из PLA пластика: а — в осях  $F-\Delta l$ ; б — в осях  $\sigma-\epsilon$

Аналогичные диаграммы получаются при величине заполнения 75 % и 50 %.

Из диаграмм сжатия (рисунок 2, б) видно, что:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\epsilon} = E,$$

где  $\sigma$  — напряжение, МПа;

$\epsilon$  — относительное сжатие, %;

$E$  — модуль продольной упругости, МПа.

Таким образом модуль продольной упругости  $E$  графически представляет собой тангенс угла наклона прямолинейного участка диаграммы к оси абсцисс (рисунок 2, б).

Анализ результатов показывает, что при заполнении образца на 75 % несущая способность образца снижается по сравнению со 100 % заполнением на 16 %, модуль продольной упругости на 2,4 %, напряжение текучести на 3,8 %. При заполнении образцов на 50 % — несущая способность образца снижается на 29,5 %, модуль продольной упругости на 2,8 %, напряжение текучести на 5,9 %.

**Заключение.** Анализ проведенных исследований показывает, что упругие деформации PLA пластика не превышают 3 %, а пластические деформации в десятки раз могут превышать упругие, их развитие в перенапряженных элементах сложных конструкций приводит к перераспределению и выравниванию усилий за счет догрузки менее напряженных элементов. Тем самым повышается работоспособность конструкции в целом по сравнению с расчетными пределами.

Работа материала в пластической стадии представляет огромный резерв прочности, благодаря которому конструкция, как правило, не разрушается в прямом смысле (нарушение целостности), а теряет несущую способность из-за больших остаточных деформаций. Изменение % заполнения элементов конструкции снижает несущую способность, но при этом в конструкции происходит перераспределение напряжений, о чем свидетельствует их изменение в небольшом диапазоне.

Создание конструкций из PLA пластика с помощью технологии FDM обладает значительным потенциалом и нуждается в дальнейшем исследовании.

#### Список использованных источников

1. Моделирование методом наплавления [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Моделирование\\_методом\\_наплавления](https://ru.wikipedia.org/wiki/Моделирование_методом_наплавления). — Дата доступа: 18.04.2021.
2. ГОСТ 4651–2014 Пластмассы. Метод испытания на сжатие
3. ГОСТ 28840–90 Машин для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования