

УДК 621.98.043:621.9.06

Исследование влияния параметров печати на прочность FDM штампов

Сережкин Михаил Александрович^(*)

pehobatop@gmail.com

SPIN-код:3499-0234

Новгородова Мария Васильевна

novgoromar@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлены экспериментальные исследования прочностных характеристик FDM-печатных инструментов, используемых при гибке алюминиевых заготовок. Проведена оценка условного предела текучести PLA-образцов при различных параметрах печати. Оценена стойкость инструмента и качество поверхности после деформации, пружинение.

Ключевые слова: FDM, 3D-печать, гибка, PLA, листогибочный пресс, прочность

The research of the influence of printing parameters on the strength of fdm stamps

Serezhkin Mikhail Alexandrovich

pehobatop@gmail.com

SPIN-code: 3499-0234

Novgorodova Maria Vasilievna

novgoromar@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents experimental studies of the strength characteristics of FDM printing tools used in bending aluminum blanks. The conditional yield strength of PLA samples was estimated under various printing parameters. The tool durability and surface quality after deformation, springback were estimated.

Keywords: FDM, 3D printing, bending, PLA, press brake, strength

Введение. Интенсификация производственных процессов в условиях ремонтного и мелкосерийного выпуска требует мобильности технологий и снижения затрат на изготовление оснастки. Аддитивные технологии, в частности Fused Deposition Modeling (FDM), привлекательны в качестве средства быстрого прототипирования и изготовления инструментов для листогибочных процессов. Одним из перспективных направлений является использование 3D-печатных инструментов, изготовленных методом FDM. Такой инструмент, несмотря на сравнительно низкую прочность, может успешно применяться при гибке алюминиевых заготовок в единичном и мелкосерийном производстве. Снижение сроков и затрат на изготовление инструмента особенно важно при мелкосерийных и ремонтных производствах, где применение металлических штампов экономически нецелесообразно [1]. В исслед-

дованиях Тондини, Бассо и Нильсена инструментальные заготовки, изготовленные методом FDM, успешно применялись для V-гибки миллиметровых алюминиевых листов. Установлено, что геометрическая точность и угол пружинения деталей достигают приемлемых значений после нескольких циклов, а текстура поверхности стабилизируется. Кроме того, был выявлен значительный эффект ориентации печати и толщины оболочки на жесткость инструмента [2]. Дургун и Шух с коллегами [3, 4] также подтвердили пригодность аддитивно созданных инструментов в гибке и глубокой вытяжке. Экспериментальные и численные исследования [3, 4] показали стабильность характеристик на рабочих объемах до сотни изделий. Таким образом, существующие исследования указывают на следующие преимущества и ограничения применения FDM-штампов: максимальная экономия времени и средств (особенно при мелких сериях и частой смене геометрии инструментов), повторяемость геометрии сгиба (угол и радиус стабилизированы после первых циклов), минимальный абразивный износ (поверхность заготовок не повреждается), ограничения по нагрузке и долговечности (инструменты покажут износ или пластические деформации при больших партиях или толщине изделия) [5].

Материалы и методы. Для проведения испытаний использовались цилиндрические образцы, изготовленные методом FDM-печати из материала PLA. Форма и размеры образцов соответствовали требованиям стандарта ASTM D695. Образцы были изготовлены в форме цилиндра (рис. 1).

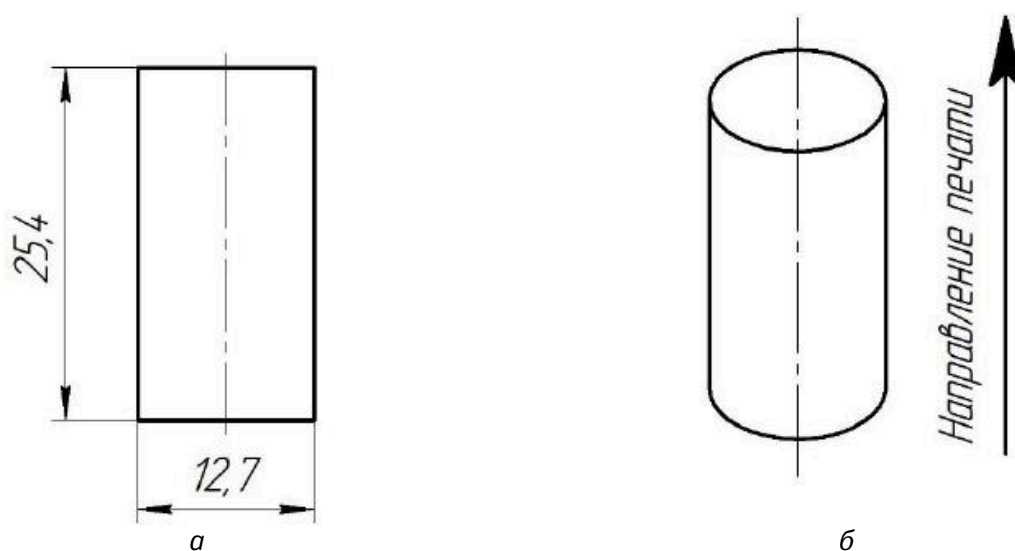


Рис. 1. Параметры образцов для проведения испытаний:
а — геометрические параметры образца; б — направление печати

В табл. 1 приведены параметры печати образцов. Температура сопла экструдера и скорость печати была постоянной и соответствовала рекомендуемым для испытываемого материала значениям и соответствовала $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 60\text{ мм/с}$. Заполняемость образцов варьировалась от 0 до 100 %, количество стенок варьировалось от 1 до 15.

Таблица 1

Параметры печати

Параметр	Значение
Диаметр сопла, мм	0,4
Коэффициент экструзии	1,0
Количество верхних и нижних слоев	1,0
Форма заполнения	Треугольник

Параметры образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры образцов

№	Количество стенок, штук	№	Заполнение, %
1	1	7	0
2	3	8	20
3	6	9	40
4	9	10	60
5	12	11	80
6	15	12	100



Рис. 2. Машина для испытания УТС-Р-250-0,5

Испытания проводили на универсальной испытательной машине УТС-Р-250-0,5 (рис. 2). Скорость осадки составляла $1,3 \pm 0,3$ мм/мин ($0,050 \pm 0,010$

дьюм/мин). Температура и влажность помещения соответствовала стандартным лабораторным условиям: температура 20 ± 2 °C и относительная влажность 50 ± 5 % согласно стандарту ASTM D618. Испытуемые образцы находились в термическом равновесии с атмосферой лаборатории. Выдерживание образцов до 22 °C и 50 % относительной влажности производилось в течение 88 часов. Для проведения достоверных испытаний, использовались образцы новейшей даты производства, что исключало влияние изменения свойств материалов со временем. Порядок проведения испытаний рандомизировался, каждый опыт повторялся 3 раза.

Результаты и их обсуждение. На рис. 3 представлена аппроксимированная зависимость условного предела текучести образцов из PLA, полученных методом FDM-печати, от процента внутреннего заполнения. Полученная кривая аппроксимирована квадратичной функцией. Наблюдается четко выраженная квадратичная зависимость между увеличением процента заполнения и значением предела текучести. При низких значениях заполнения (0–40 %) прочность растет относительно медленно, однако начиная с 60 % происходит резкое увеличение механической прочности. Образцы с 0–20 % заполнения демонстрируют крайне низкие значения условного предела текучести, что связано с отсутствием сплошной внутренней структуры, не способной эффективно сопротивляться нагрузке на сжатие. Эти образцы преимущественно деформируются за счет смятия ячеек заполнения.

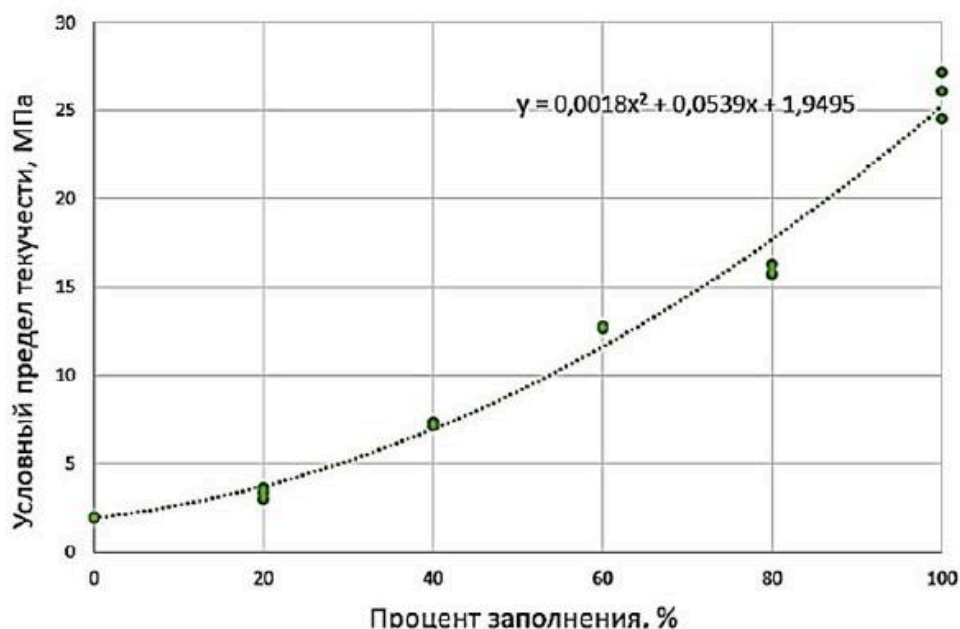


Рис. 3. Зависимость условного предела текучести от процента заполнения

При увеличении заполнения до 60–80 % образцы несущей внутренней решетки. В данной области скорость роста предела текучести ускоряется. Максимальное значение условного предела текучести (~26–27 МПа) достигается при 100 % заполнения, при этом дальнейшее увеличение массы образца не приводит к пропорциональному приросту начинают демонстрировать устой-

чивое сопротивление нагрузке, что связано с формированием прочности. Это указывает на приближение материала к пределу, определяемому его собственной микроструктурой и связями между слоями. Экспериментальных точек аппроксимирующей функции (коэффициент детерминации R^2 близок к 1), что свидетельствует о корректности выбранной модели для описания рассматриваемой зависимости.

На рис. 4 представлена линейная зависимость условного предела текучести образцов из PLA-пластика от количества внешних стенок, заданных при FDM-печати. Аппроксимация полученной зависимости описывается линейной функцией. Увеличение количества стенок приводит к линейному росту предела текучести. Каждый дополнительный слой внешней оболочки повышает сопротивление образца нагрузке на сжатие примерно на 2,33 МПа. Это указывает на то, что механическая прочность образца, в первую очередь, обеспечивается именно наружными слоями, формирующими несущую оболочку. Наружные стенки в образцах, полученных методом FDM, воспринимают значительную часть нагрузок, особенно при испытаниях на сжатие вдоль вертикальной оси (по Z-направлению). Их увеличение эквивалентно утолщению стенки цилиндра и приводит к существенному росту жесткости. При увеличении числа стенок с 1 до 15 условный предел текучести увеличивается более чем в 5 раз. Это позволяет при необходимости целенаправленно управлять механическими характеристиками изделия, не изменяя схему заполнения. Увеличение числа стенок сопровождается увеличением времени печати, повышенным расходом филамента и термическими напряжениями. Таким образом, оптимальный выбор количества стенок должен учитывать компромисс между прочностью, массой и производительностью. Высокая точность линейной аппроксимации (визуально R^2 близок к 1) подтверждает прямую корреляцию между числом стенок и пределом текучести, особенно в пределах до 12–15 оболочек.

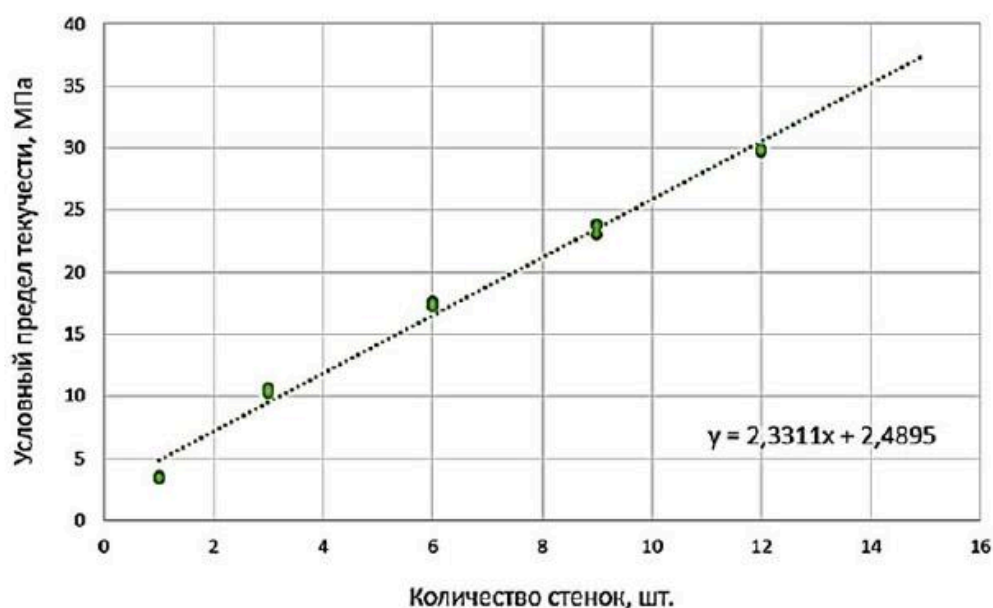


Рис. 4. Зависимость условного предела текучести от количества стенок

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили существенное влияние параметров FDM-печати — процента внутреннего заполнения и количества внешних стенок на условный предел текучести образцов из PLA-пластика, что напрямую определяет прочностные характеристики печатной оснастки. Установлено, что зависимость прочности от процента заполнения носит выражено нелинейный характер: при увеличении плотности от 0 до 100 % условный предел текучести возрастает более чем в 12 раз, достигая значений порядка 26–27 МПа. При этом наибольший прирост прочности наблюдается в диапазоне от 60 % и выше, что связано с формированием сплошной несущей внутренней структуры. В то же время зависимость прочности от количества стенок характеризуется линейной динамикой, при которой каждое дополнительное утолщение оболочки обеспечивает увеличение предела текучести примерно на 2,33 МПа. Это подчеркивает ключевую роль внешней оболочки в восприятии сжимающих нагрузок, особенно при вертикальной ориентации печати. Полученные данные позволяют сделать вывод, что оптимизация конструкции FDM-оснастки для гибки должна опираться на комбинированное регулирование параметров печати: при обеспечении 80–100 % заполнения и наличии не менее 9–12 стенок достигается необходимый уровень прочности инструмента без избыточного увеличения времени печати и расхода материала. Представленные зависимости могут быть использованы для инженерного прогнозирования прочности и долговечности аддитивно изготовленных штампов в условиях малосерийного и ремонтного производства.

Список источников

- [1] Tondini F., Basso A., Arinbjarnar U., Nielsen C.V. The Performance of 3D Printed Polymer Tools in Sheet Metal Forming. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 8, art. no. 1256. <https://doi.org/10.3390/met11081256>
- [2] Fabrication and performance of 3D printed plastic tools for air bending. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 66, pp. 460–469.
- [3] Gonzalez P.R. et al. Analysis of Printing Parameters for Sheet Metal Bending with FDM Printed Tool. *Key Engineering Materials*, 2023, vol. 960, pp. 29–36.
- [4] Schuh G., Bergweiler G., Bickendorf P. et al. Sheet metal forming using additively manufactured polymer tools. *Proc. CIRP*, 2020, vol. 93. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.013>
- [5] Сережкин М.А., Гроссман М.Ф. Моделирование параметров прочности инструментальной оснастки для листовой штамповки, изготовленной методом FDM печати. *Наукоемкие технологии в машиностроении. 15-я Междунар. науч.-техн. конф.: материалы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024, т. 1, с. 201–207.