

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ, ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

В данной статье рассматривается способ оптимизации распределения материала внутри образца, полученного с помощью 3D-печати. Рассматривается несколько вариантов распределения материала, в том числе по форме балки равного сопротивления при сохранении внешнего каркаса образца в виде прямоугольного параллелепипеда с квадратным сечением. Изготовленные образцы подвергались разрушению при испытании на статический изгиб. Полученные результаты показывают уменьшение используемого материала на 30 % и сохранение прочностных свойств образцов относительно образца со 100 %-ным заполнением материалом. Приведены результаты эксперимента и отмечены вопросы для дальнейших исследований.

Ключевые слова: аддитивные технологии, балка равного сопротивления, топологическая оптимизация, 3D-печать, испытание на статический изгиб, механические свойства, снижение массы.

Введение. Топологическая оптимизация определяется как создание оптимальной конструкции детали с распределением массы таким образом, что сохраняются ее свойства соответствовать всем требованиям эксплуатации, в том числе выдерживать определенные нагрузки. Само направление сформировалось и исследовалось в 1980-х годах, но практическое применение и распространение начало находить в последнее время за счет появления и развития аддитивной технологии.

Одним из примеров можно отметить работу компании Airbus. Которая в 2016 году представила электромотоцикл с рамой, изготовленной с помощью технологии 3D-печати — SLM. При этом форма рамы была существенно оптимизирована и отличается от стандартных конструкций. В результате вес мотоцикла всего 35 кг, что на 35 % меньше аналогичных электромотоциклов со стандартной конструкцией рамы.

Также отметим работу в МГТУ им. Н. Э. Баумана, где провели модернизацию стойки подвески с помощью топологической оптимизации и 3D-печати (рис. 1) [1].

В результате применения топологической оптимизации получили бионическую форму конструкции поворотной стойки, которая прошла проверку на прочность с помощью цифрового моделирования [2]. Для 3D-печати рассчитали остаточные напряжения, коробления и геометрические отклонения в процессе остывания. Для печати применялся материал — высокопрочный порошковый алюминий.

В итоге за счет применения топологической оптимизации и 3D-печати вес детали уменьшился в 2 раза. Также данные методы позволяют уменьшить количество деталей в узлах, создавать конструкции, которые раньше было невозможно получить, уменьшить количество сборок в узлах, а также создавать изделие без склеек, спаек и т.д. [2, 3]. С каждым годом примеров успешного применения топологической оптимизации совместно с 3D-печатью в машиностроении становится больше.

3D-печать металлом использует метод селективного лазерного спекания (SLM) и прямое лазерное спекание металлов (DSLM). Также существует метод с послойным соединением, при котором склеиваются частицы металла для последующего обжига

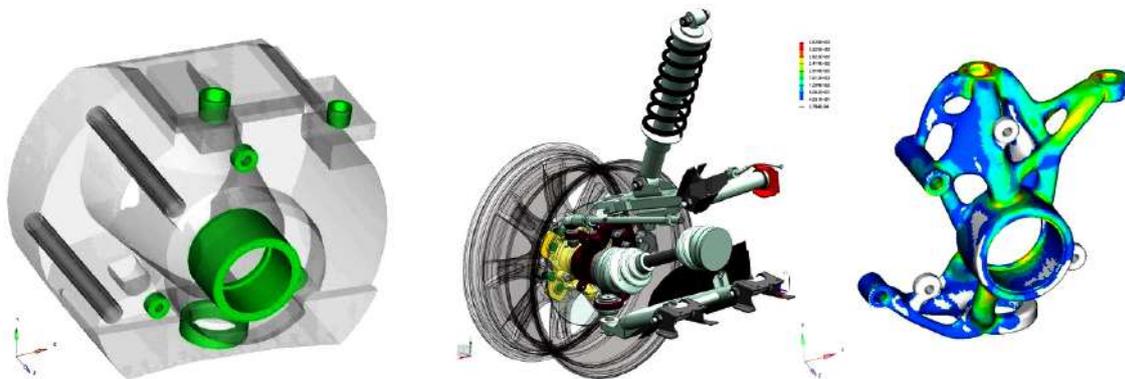


Рис. 1. Результат применения топологической оптимизации стойки подвески

в высокотемпературной печи, где частицы сплавляются под давлением, составляя единое металлическое целое. Печатная головка наносит соединительный раствор на порошковую подложку послойно, как обычный принтер на листы бумаги, после чего изделие отправляется в обжиг. В качестве материалов используются различные металлические порошки, например, из нержавеющей стали 316L Unit3DMetal, алюминиевый сплав AlSi10Mg и др. Отметим также метод прямой лазерной наплавки DED — представляет собой метод послойного наращивания деталей. Материал подается в виде порошка или проволоки в месте построения.

В месте построения луч лазера формирует на поверхности создаваемой детали ванну расплава. Поступающий материал переходит в жидкое состояние и соединяется с предыдущим слоем. В зоне обработки подается также защитный газ (аргон).

Цель исследования. Исследовать применение балки равного сопротивления для оптимизации распределения материала внутри изделий, полученных методом 3D-печати FDM, с возможностью сохранения прочностных свойств.

Задачи

1. Разработать варианты распределения материала внутри образцов и изготовить их с помощью метода 3D-печати FDM.

2. Провести испытания на статический изгиб.

Основная часть. Прочность деталей задается свойствами металла и последующей термообработкой, которая проводится при необходимости получения определенных свойств материала детали [4].

Для изготовления пластмассовых изделий с помощью 3D-печати применяются методы FMD, SLM и другие. Далее будем рассматривать FMD. В данном случае прочность деталей зависит от степени адгезии (A), которая может определяться скоростью печати (v), температурой плавления (t), толщиной слоя (s), а также топологией деталей, то есть распределением материала (top), $f(A) = f(v, t, s, top)$.

В настоящее время рассматриваются вопросы прочности деталей при изготовлении методом FMD печати из пластмассы [2–6]. Наблюдается тенденция [7, 8] развития прочностных свойств пластмасс для 3D-печати. Например, можно отметить такие как полиэфирэфиркетон или РЕЕК, обладающий следующими характеристиками:

- плотность — 1,3 г/см³;
- температура плавления — 343 °С;
- температура стеклования — 143 °С;
- температура эксплуатации от –70 °С до ~230 °С, выдерживает краткосрочные нагревы до 300 °С;

- предел текучести — 120 МПа.
- Полиэфиримид (PEI), обладающий следующими характеристиками:
- плотность — 1,27 г/см³;
 - температура плавления ~370 °С;
 - температура стеклования — 217 °С;
 - температура эксплуатации от –50 °С до ~120 °С, выдерживает краткосрочные нагревы до 170 °С.

SBS (стиролбутадиен-стирол) отмечается низкой токсичностью и обладает следующими свойствами:

- температура плавления — 190–210 °С;
- температура размягчения — 76 °С;
- температура эксплуатации от –80 °С до –65 °С;

- твердость (по Роквеллу) — R118;
- прочность на изгиб — 36 МПа;
- прочность на разрыв — 34 МПа;
- модуль упругости при растяжении — 1,35 ГПа;
- модуль упругости при изгибе — 1,45 ГПа;
- температура стеклования — 95 °С;
- плотность — 1,01 г/см³.

Можно также отметить Nylon, который является более доступным по цене и не требует особых свойств 3D-принтера, с характеристиками:

- плотность — 1,134 г/см³;
- влагопоглощение — 3,09%;
- прочность на разрыв — 65,99 МПа;
- относительное удлинение при разрыве — более 300 %.

Для исследования прочностных свойств при различном распределении материала внутри детали были созданы образцы в соответствии с [9], с размерами 30×30×80 из нескольких видов пластмасс.

Распределение материала внутри образца выполнялось в двух вариантах в горизонтальном сечении, как показано на рис. 2а и 2б. По высоте все горизонтальные сечения одинаковы. Как известно, при изгибе по схеме нагружения по рис. 3 нормальные напряжения изгиба изменяются по линейному закону (закону треугольника) от нуля в сечениях опорных призм до максимума в сечении приложения силы F . Площадь сечения также изменяется по закону треугольника. То есть в сечениях с меньшим напряжением меньший объем материала. Все стенки каркаса образца, включая верхнюю и нижнюю, одинаковы и равны 2 мм.

Результаты сравнивались с образцом сплошного заполнения материалом по всему объему.

Распределение материала в сечениях а–а и б–б показаны на рис. 3.

Схема нагружения представлена на рис. 4.

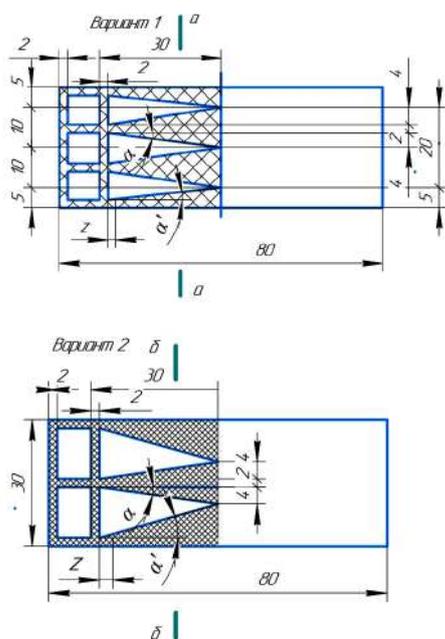


Рис. 2. Распределение материала внутри образца:
а) по 1-му варианту (горизонтальное сечение);
б) по 2-му варианту

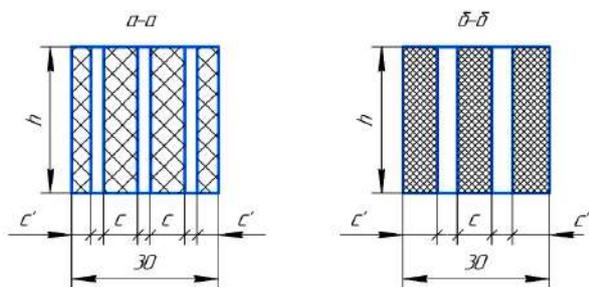


Рис. 3. Распределение материала в сечениях а-а и б-б

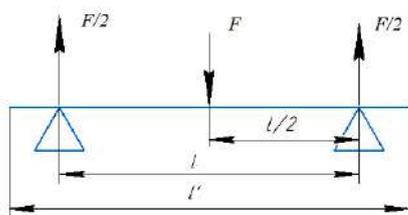


Рис. 4. Схема нагружения образца:
 $l = 80$ мм — длина образца;
 $l' = 60$ мм — расстояние между опорными призмами испытательной машины

Соотношение распределения материала в рабочей части образцов длиной 60 мм, выполненных по вариантам 1, 2 и заполненного по всему объему, определим из соотношения объемов образцов.

Объем пустоты в образцах вариантов 1 и 2:

$$V_1 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 22 \cdot 28 \cdot 26 = 16016 \text{ мм}^3,$$

$$V_2 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 28 \cdot 26 = 17472 \text{ мм}^3,$$

(1)



Рис. 5. Диаграмма нагружения образца, заполненного по всему объему

где 2 — две половины образца; 22 и 24 — общая ширина треугольников пустоты в образцах 1 и 2; 28 — высота треугольников; 26 — высота пустоты в образце (за исключением толщины верхней и нижней стенок каркаса).

Объем образца, заполненного по всему объему,

$$V = 30 \cdot 60 \cdot 30 = 54000 \text{ мм}^3. \quad (2)$$

Соотношение объемов пустоты в образцах 1 и 2 вариантов к объему цельного образца

$$\frac{V_1}{V} = \frac{16016}{54000} \cdot 100 = 29,7\%, \quad \frac{V_2}{V} = \frac{17472}{54000} \cdot 100 = 32,4\%.$$

Так как материал однороден, то его экономия составляет приблизительно 30 % (в первом случае — 29,7 %, во втором — 32,4 %).

При определении нормальных напряжений изгиба $\sigma_{из}$ в сечениях образца по его длине переменными величинами являются изгибающий момент $M_{из}$ и осевой момент сопротивления W_x , которые зависят от переменной z .

При испытании на машине ЛКСМ 1К в соответствии со схемой по рис. 4 образца, заполненного по всему объему, получили предельную нагрузку $F = 18,2$ кН (рис. 5), при которой происходит его разрушение.

Поперечное сечение образца представляет собой фигуру, состоящую из четырех прямоугольников одинаковой высоты ($h = 30$ мм), см. рис. 2 и 3. При этом осевой момент сопротивления можно определить по формуле:

$$W_x = \frac{bh^2}{6} = b \frac{30^2}{6} = 150b, \quad (3)$$

где b — суммарная ширина прямоугольников в поперечных сечениях образца.

Текущее значение суммарной ширины прямоугольников в зависимости от z :

— для варианта 1 (рис. 2а)

$$b = 2c + 2c' = 2[2(z-2)\text{tg}\alpha + 2] + 2[(z-2)\text{tg}\alpha' + 2],$$

где $\text{tg}\alpha = 4/28$, $\text{tg}\alpha' = 3/28$, после преобразований $b = 0,7857z + 6,4286$;

— для варианта 2 (рис. 2б)

$$b = c + 2c' = [2(z-2)\text{tg}\alpha + 2] + 2[(z-2)\text{tg}\alpha' + 2],$$

где $\text{tg}\alpha = 4/28$, $\text{tg}\alpha' = 8/28$, после преобразований $b = 0,8571z + 4,2858$.

Напряжения изгиба в зависимости от переменной z

Параметр	Значение переменной z , мм					
	5	10	15	20	25	30
Вариант образца 1						
b , мм	10,36	14,29	18,21	22,14	26,07	30
$M_{из}$, Нмм	45500	91000	136500	182000	227500	273000
$W_{x'}$, мм ³	1554	2143,5	2731,5	3321	3910,5	4500
$\alpha_{из}$, МПа	29,28	42,46	49,97	54,80	58,18	60,67
Вариант образца 2						
b , мм	7,5	10	12,5	15	17,5	20
$M_{из}$, Нмм	45500	91000	136500	182000	227500	273000
$W_{x'}$, мм ³	1285,5	1929	2571	3214,5	3856,5	4500
$\alpha_{из}$, МПа	35,39	47,17	53,09	56,62	58,99	60,67

Текущее значение изгибающего момента в сечениях образца в зависимости от z

$$M_{из} = \frac{F}{2} z = \frac{18200}{2} z = 9100 z.$$

Значения параметров и напряжений изгиба в зависимости от переменной z с шагом 5 мм представлены в табл. 1. Максимальные напряжения у обоих вариантов образцов возникают в средней части и уменьшаются к их концам. То есть сечения, находящиеся ближе к концам, недогружены.

С целью выравнивания напряжений по длине и экономии материала применены образцы в виде балок равного сопротивления изгибу [10, 11] (рис. 6). При этом текущее значение осевого момента сопротивления при одинаковом напряжении во всех сечениях равно $\sigma_{имак} = 60,67$ МПа.

$$W_x = \frac{M_{из}}{\sigma_{имак}} = \frac{9100 z}{60,67} = 150 z. \quad (4)$$

Из равенства осевых моментов сопротивления, определенных по формулам (3) и (4), $150b = 150z$ текущее значение суммарной ширины прямоугольников сечения

$$b = \frac{150z}{150} = z.$$

Для обеспечения жесткости принимаем толщину внутренних ребер на концах образцов, как и толщину боковых стенок каркаса, равной 2 мм (рис. 6). Тогда расстояние (координата) постоянного сечения в образцах вариантов 1 и 2

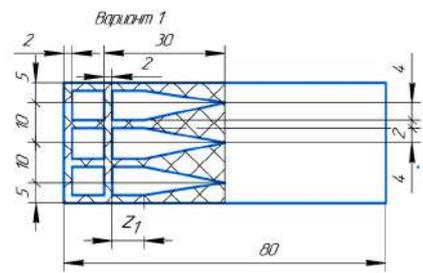
$$z_1 = \frac{150b_1}{150} = \frac{150 \cdot 8}{150} = 8 \text{ мм},$$

$$z_2 = \frac{150b_2}{150} = \frac{150 \cdot 6}{150} = 6 \text{ мм},$$

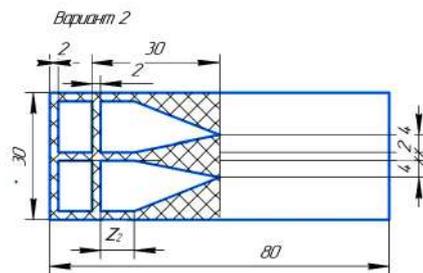
где $b_1 = 8$, $b_2 = 6$ — суммарная ширина прямоугольников сечений.

Напряжения изгиба в образцах равного сопротивления изгибу в зависимости от переменной z с шагом 5 мм представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что на участках образцов с переменным сечением напряжения изгиба одинаковы



а)



б)

Рис. 6. Распределение материала по результатам расчетов:
а) для 1-го варианта; б) для 2-го варианта

$\sigma_{из} = 60,67$ МПа, то есть, получены образцы с равным сопротивлением изгибу.

Объем пустоты в образцах равного сопротивления изгибу в первом и втором вариантах в соответствии с формулами (1) и рис. 7:

$$V_1 = 2 \left[\frac{1}{2} \cdot 22 \cdot (30 - 8) \cdot 26 + 22 \cdot (8 - 2) \cdot 26 \right] = 19448 \text{ мм}^3,$$

$$V_2 = 2 \left[\frac{1}{2} \cdot 24 \cdot (30 - 6) \cdot 26 + 24 \cdot (6 - 2) \cdot 26 \right] = 19968 \text{ мм}^3.$$

Соотношение объемов пустоты в образцах равного сопротивления изгибу в первом и втором вариантах к объему цельного образца

$$\frac{V_1}{V} = \frac{19448}{54000} 100 = 36,0\%, \quad \frac{V_2}{V} = \frac{19968}{54000} 100 = 37,0\%,$$

где V — см. формулу (2).

Напряжения изгиба в образцах равного сопротивления изгибу
в зависимости от переменной z

Параметр	Значение переменной z , мм					
	5	10	15	20	25	30
Вариант образца 1						
b , мм	8,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
$M_{и'}$, Нмм	45500	91000	136500	182000	227500	273000
$W_{x'}$, мм ³	1200	1500	2250	3000	3750	4500
$\alpha_{и'}$, МПа	37,92	60,67	60,67	60,67	60,67	60,67
Вариант образца 2						
b , мм	6,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
$M_{и'}$, Нмм	45500	91000	136500	182000	227500	273000
$W_{x'}$, мм ³	900	1500	2250	3000	3750	4500
$\alpha_{и'}$, МПа	50,56	60,67	60,67	60,67	60,67	60,67

Таблица 3

Результаты экспериментальных испытаний образцов

Заполненность образца и вариант распределения материала	Среднее значение максимальной силы F_{max} при которой происходит разрушение образца, кН	Отклонение значения F_{max} для образцов от F_{max} для образца, заполненного материалом на 100 %, %
100 % заполненность	16,57	1
Балка равного сопротивления по 1-му варианту	15,5	6,5
Балка равного сопротивления по 2-му варианту	10,8	35
Материал внутри образца распределен по 1-му варианту	14,1	15
Материал внутри образца распределен по 2-му варианту	10,6	36,1

Увеличение экономии материала в образцах равного сопротивления изгибу: при первом варианте на 6,3 %, при втором варианте на 4,6 %. Общая экономия материала составила в среднем 36,5 %.

Распределение материала внутри образца по результатам расчетов представлено на рис. 6а и 6б.

Основные результаты. Результаты экспериментальных испытаний образцов представлены в табл. 3. Для проведения испытаний были изготовлены по несколько образцов каждого из вариантов из пластмассы ABS. Были изготовлены 100 % заполненные образцы, образцы по первому и второму вариантам распределения материала (рис. 2а, 2б) и образцы балок равного сопротивления по первому и второму вариантам распределения материала (рис. 6а, 6б).

Заключение. Полученные результаты показывают, что образцы балок равного сопротивления по первому варианту распределения материала имеют меньшее значение максимальной разрушающей нагрузки на ~10 %. Остальные образцы от 15 до ~36 %. Это связано с особенностями технологии FDM-печати, при которой получают изделия послойным спеканием горизонтальных слоев, прочность спекания которых существенно зависит от условий изготовления и параметров режимов FDM-печати. В образцах с меньшей площадью спекания по сравнению с образцом, заполненным материалом по всему объему, разрушение происходит со сдвигом в этих слоях (рис. 7а, 7б).

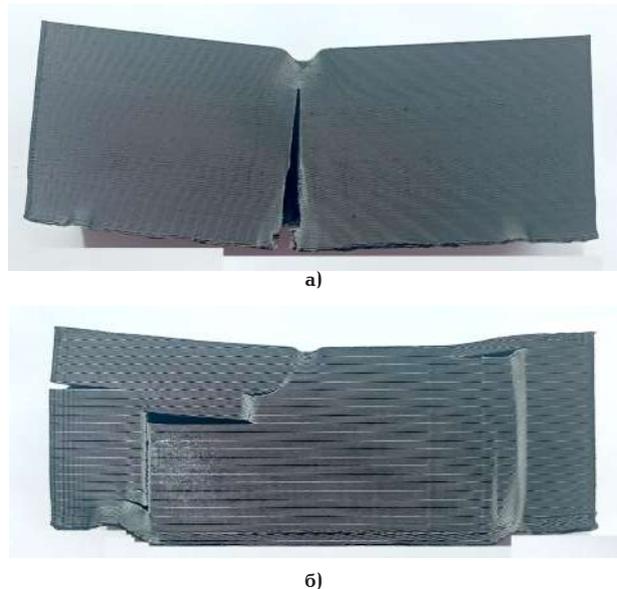


Рис. 7. а) разрушение образца заполненным материалом по всему объему; б) разрушение образца с меньшей площадью спекания

При этом уменьшается максимальная разрушающая нагрузка F_{max} , так как образец работает не как цельная балка, а как пакет пластин с каса-

тельными силами между спекаемыми слоями. Поэтому прочность понижается. Величина касательных сил зависит от качества спекания слоев. Кроме того, прочность изделий связана с анизотропией их механических свойств. В статье показана возможность распределения материала в соответствии с линейным законом изменения нормального напряжения в балке квадратного сечения в двух вариантах, в том числе и для балки равного сопротивления. Такое распределение стало возможным за счет применения аддитивных технологий. В среднем по исследуемым образцам масса и расход материала уменьшились на 30 %. Но в силу описанных выше особенностей технологии FDM-печати прочность уменьшилась на значения 10...36 %. В дальнейших исследованиях необходимо учитывать влияние условий изготовления и параметров режимов FDM-печати и анизотропию, возникающую при нагружении образца, на прочность изделий.

Список источников

1. Озеров А. Топологическая оптимизация и 3D-печать как пример взаимного развития. QIB Technologies. URL: <https://blog.iqb.ru/topology-optimization-3d-printing/> (дата обращения: 07.07.2024).
2. Анциферов С. И., Карачевцева А. В., Сычёв Е. А., Литвишко А. А. Топологическая оптимизация элементов конструкции роботизированной ячейки // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2023. № 11. С. 93–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102. EDN: FODJWS.
3. Русских Г. С., Шалыгин С. В. Алгоритм формирования внутренней структуры изделия с учетом напряженно-деформированного состояния на примере трехточечного изгиба // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С. 80–85. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-80-85. EDN: TXWRGA.
4. Кондратов С. В., Пыхтин А. А., Ларионов С. А., Сорокин А. Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49. EDN: RARUXZ.
5. Шимохин А. В., Союнов А. С., Биткина Е. Е., Янковский К. А. К вопросу о применении аддитивной технологии на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 5. С. 357–365. DOI: 10.17816/0321-4443-111103. EDN: KPBBLF.
6. Петрова Г. Н., Платонов М. М., Большаков В. А. [и др.]. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM-технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства // Пластические массы. 2016. № 5–6. С. 53–58. EDN: WIOBNL.
7. Коваленко Р. В. Современные полимерные материалы и технологии 3D-печати // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 1. С. 263–266. EDN: TJKZCT.
8. Кичко А. Е. Анализ современных материалов для 3D-печати // 72-я Междунар. студ. науч. техн. конф.: материалы конф., Астрахань, 18–23 апреля 2022 года. Астрахань: Изд-во АГУ, 2022. С. 758–760. EDN: SRYIOG.
9. ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010). Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. Введ. 01–03–2015. Москва: Стандартинформ, 2016. 20 с.
10. Богданов В. В., Иванов Р. В. К вопросу использования балок равного сопротивления изгибу с переменным поперечным сечением // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов: сб. материалов XVII

Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 27 декабря 2022 года. Москва: Печатный цех, 2022. С. 228–234.

11. Кузубов А. С., Бушуев Д. А., Паращук Е. М. Построение и валидация конечно-элементной виртуальной модели балки равного сопротивления весоизмерительной системы // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2019. Т. 46, № 2. С. 274–282. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-2-274-282. EDN: JPWOJO.

ШИМОХИН Антон Владимирович, кандидат экономических наук, доцент (Россия), доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (Омский ГАУ), г. Омск.

SPIN-код: 2830-8008

AuthorID (РИНЦ): 700145

ORCID: 0000-0002-2048-3180

AuthorID (SCOPUS): 57203345154

ResearcherID: ACS-9917-2022

Адрес для переписки: Av.shimokhin@omgau.org

СОРОКИН Анатолий Никифорович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского ГАУ, г. Омск.

SPIN-код: 2670-1234

AuthorID (РИНЦ): 714190

ORCID: 0009-0004-0510-2089

AuthorID (SCOPUS): 57209773219

Адрес для переписки: An.sorokin@omgau.org

БОЛТОВСКИЙ Сергей Николаевич, старший преподаватель кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского ГАУ, г. Омск.

SPIN-код: 6962-3388

AuthorID (РИНЦ): 1068092

ORCID: 0000-0002-9743-4301

AuthorID (SCOPUS): 57203345154

ResearcherID: ACS-9917-2022

Адрес для переписки: sn.boltovskiy@omgau.org

КУЗНЕЦОВА Виктория Николаевна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), г. Омск.

SPIN-код: 1039-7546

AuthorID (РИНЦ): 1068092

ORCID: 0000-0003-3546-0894

Адрес для переписки: dissovetsibadi@bk.ru

КУЗНЕЦОВ Илья Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» СибАДИ, г. Омск.

SPIN-код: 6890-3069

AuthorID (РИНЦ): 1068092

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Адрес для переписки: ilyxa_kyznetsov@vk.com

Для цитирования

Шимохин А. В., Сорокин А. Н., Болтовский С. Н., Кузнецова В. Н., Кузнецов И. С. Исследование прочностных свойств изделий, полученных с помощью 3D-печати, при деформации изгиба для оптимизации распределения материала // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 30–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-30-37. EDN: MVIKFZ.

Статья поступила в редакцию 16.09.2024 г.

© А. В. Шимохин, А. Н. Сорокин, С. Н. Болтовский, В. Н. Кузнецова, И. С. Кузнецов

INVESTIGATION OF THE STRENGTH PROPERTY OF 3D PRINTED PRODUCTS IN BENDING DEFORMATION TO OPTIMIZE MATERIAL DISTRIBUTION

The article considers a method of optimal material distribution inside a 3D printed sample. Several variants of material distribution are considered, including the beam shape of equal resistance while retaining the outer frame of the specimen as a rectangular parallelepiped with a square cross-section. The manufactured samples are subjected to destruction during static bending testing. The results show the reduction of used material by 30 % and preservation of specimen strength properties with 100 % material filling. Moreover, experimental results are presented and research issues for further investigations are highlighted.

Keywords: additive technologies, equal resistance beam, topology optimization, 3D printing, static bending test, mechanical properties, weight reduction.

References

1. Ozerov A. Topologicheskaya optimizatsiya i 3D-pechat' kak primer vzaimnogo razvitiya. QIB Tehnologies [Topological optimization and 3D-printing as examples of cross-development]. URL: <https://blog.iqb.ru/topology-optimization-3d-printing/> (accessed: 07.07.2024). (In Russ.).

2. Antsiferov S. I., Karachevtseva A. V., Sychev E. A., Litvishko A. A. Topologicheskaya optimizatsiya elementov konstruktivnoy robotizirovannoy yacheyki [Topological optimization of design elements of a robotic cell]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after V. G. Shukhov*. 2023. No. 11. P. 93–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102. EDN: FODJWS. (In Russ.).

3. Russkikh G. S., Shalygin S. V. Algoritm formirovaniya vnutrenney struktury izdeliya s uchetom napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na primere trekhtocheynogo izgiba [The algorithm for generating internal structure of product considering stress-strain on example three-point bending]. Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 80–85. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-80-85. EDN: TXWRGA. (In Russ.).

4. Kondratov S. V., Pykhtin A. A., Larionov S. A., Sorokin A. E. Vliyaniye tekhnologicheskikh rezhimov FDM-pechaty i sostava ispol'zuyemykh materialov na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki FDM-modeley (obzor) [Influence of the

technological FDM-modes of the press and structure of used materials on physic-mechanical characteristics of FDM-models (review)]. Trudy VIAM. *Proceedings of VIAM*. 2019. No. 10 (82). P. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49. EDN: RARUXZ. (In Russ.).

5. Shimokhin A. V., Soyunov A. S., Bitkina E. E., Yankovskiy K. A. K voprosu o primeneni additivnoy tekhnologii na predpriyat'yakh sel'skokhozyaystvennogo mashinostroyeniya [On applicability of additive technology at agricultural engineering enterprises]. Traktory i sel'khoz mashiny. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022. Vol. 89, no. 5. P. 357–365. DOI: 10.17816/0321-4443-111103. EDN: KPBBLF. (In Russ.).

6. Petrova G. N., Platonov M. M., Bol'shakov V. A. [et al.]. Issledovaniye kompleksa kharakteristik bazovykh materialov dlya FDM-tekhnologii additivnogo sinteza. Fiziko-mekhanicheskiye i teplofizicheskiye svoystva [Research of the complex of characteristics of base materials for fdm of technology of the additive synthesis. physico-mechanical and heat-physical properties]. *Plasticheskiye massy. Plasticheskie Massy*. 2016. No. 5–6. P. 53–58. EDN: WIOBNL. (In Russ.).

7. Kovalenko R. V. Sovremennyye polimernyye materialy i tekhnologii 3D pechaty [Modern polymer materials and 3D printing technologies]. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. *Herald of Technological University*. 2015. Vol. 18, no. 1. P. 263–266. EDN: TJKZCT. (In Russ.).

8. Kichko A. E. Analiz sovremennykh materialov dlya 3D-pechaty [Analysis of modern 3D printing materials]. 72-ya Mezhdunar. stud. nauch. tekhn. konf. Astrakhan', 2022. P. 758–760. EDN: SRYIOG. (In Russ.).

9. GOST 4648-2014 (ISO 178:2010). Plastmassy. Metod ispytaniya na staticheskiy izgib [Plastics. Method of static bending test]. Moscow, 2016. 20 p. (In Russ.).

10. Bogdanov V. V., Ivanov R. V. K voprosu ispol'zovaniya balok ravnogo soprotivleniya izgibu s peremennym poperechnym secheniyem [To the question of use of equal bending resistance beams with variable cross-sections]. *Aktual'nyye problemy nauki i obrazovaniya v usloviyakh sovremennykh vyzovov*. Moscow, 2022. P. 228–234. (In Russ.).

11. Kuzubov A. S., Bushuev D. A., Parashchuk E. M. Postroyeniye i validatsiya konechno-elementnoy virtual'noy modeli balki ravnogo soprotivleniya vesoizmeritel'noy sistemy [Construction and validation of the finite element virtual model of the beam of equal resistance of the weight measuring system]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information Technologies*. 2019. Vol. 46, no. 2. P. 274–282. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-2-274-282. EDN: JPWOJO. (In Russ.).

SHIMOKHIN Anton Vladimirovich, Candidate of Economics Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering Department, Omsk State Agrarian University, Omsk.

SPIN-code: 2830-8008

AuthorID (RSCI): 700145

ORCID: 0000-0002-2048-3180

AuthorID (SCOPUS): 57203345154

ResearcherID: ACS-9917-2022

Correspondence address: Av.shimokhin@omgau.org

SOROKIN Anatoly Nikiforovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering Department, Omsk State Agrarian University, Omsk.

SPIN-code: 2670-1234

AuthorID (RSCI): 714190

ORCID: 0009-0004-0510-2089

AuthorID (SCOPUS): 57209773219

Correspondence address: An.sorokin@omgau.org

BOLTOVSKY Sergey Nikolaevich, Senior Lecturer of the Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering Department, Omsk State Agrarian University, Omsk.

SPIN-code: 6962-3388

AuthorID (RSCI): 1068092

ORCID: 0000-0002-9743-4301

AuthorID (SCOPUS): 57203345154

ResearcherID: ACS-9917-2022

Correspondence address: sn.boltovskiy@omgau.org

KUZNETSOVA Victoria Nikolaevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Operation of Oil, Gas and Construction Equipment Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk.

SPIN-code: 1039-7546

AuthorID (RSCI): 1068092

ORCID: 0000-0003-3546-0894

Correspondence address: dissovetsibadi@bk.ru

KUZNETSOV Ilya Sergeevich, Senior Lecturer of the Operation of Oil, Gas and Construction Equipment Department, SibADI, Omsk.

SPIN-code: 6890-3069

AuthorID (RSCI): 1068092

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Correspondence address: ilyxa_kuznetsov@vk.com

For citations

Shimokhin A. V., Sorokin A. N., Boltovsky S. N., Kuznetsova V. N., Kuznetsov I. S. Investigation of the strength property of 3D printed products in bending deformation to optimize material distribution. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 30–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-30-37. EDN: MVIKfZ.

Received September 16, 2024.

© A. V. Shimokhin, A. N. Sorokin, S. N. Boltovsky,
V. N. Kuznetsova, I. S. Kuznetsov