

УДК 621

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ШАССИ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАДИЕНТНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ СТРУКТУР
ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИУРЕТАНА**

Недобежкин В.Г. – магистрант группы КТм-241, 2 курс.

Ярославцева А.А. – магистрант группы КТм-241, 2 курс.

Кузбасский государственный технологический университет им. Т.Ф

Горбачева

Россия, г. Кемерово

Аннотация. В работе рассматривается возможность применения аддитивных технологий для создания упругодемпфирующих элементов шасси беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолётного и мультироторного типов. Предложена конструкция амортизатора на основе решётчатых структур из термопластичного полиуретана (TPU) с градиентным изменением размера ячейки по высоте. Показано, что симметрично-градиентные структуры с горизонтальными связями между слоями обеспечивают наилучшее сочетание энергопоглощения и упругого восстановления, что позволяет рекомендовать их для использования в посадочных устройствах БПЛА, работающих на неподготовленных поверхностях.

Ключевые слова. Беспилотный летательный аппарат, аддитивные технологии, термопластичный полиуретан (TPU), решётчатые структуры, градиентные свойства, энергопоглощение, 3D-печать.

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях отсутствия подготовленных взлётно-посадочных полос (грунтовые поверхности, снежный покров, городская застройка) предъявляет повышенные требования к посадочным устройствам. Жёсткие шасси передают ударные нагрузки на корпус и полезную нагрузку, что снижает ресурс конструкции и может привести к поломке корпуса, либо электромоторов и лопастей (рисунок 1). Традиционные пневматические или гидравлические амортизаторы существенно увеличивают массу и сложность конструкции, а их применение в классе малых и средних БПЛА часто нецелесообразно.

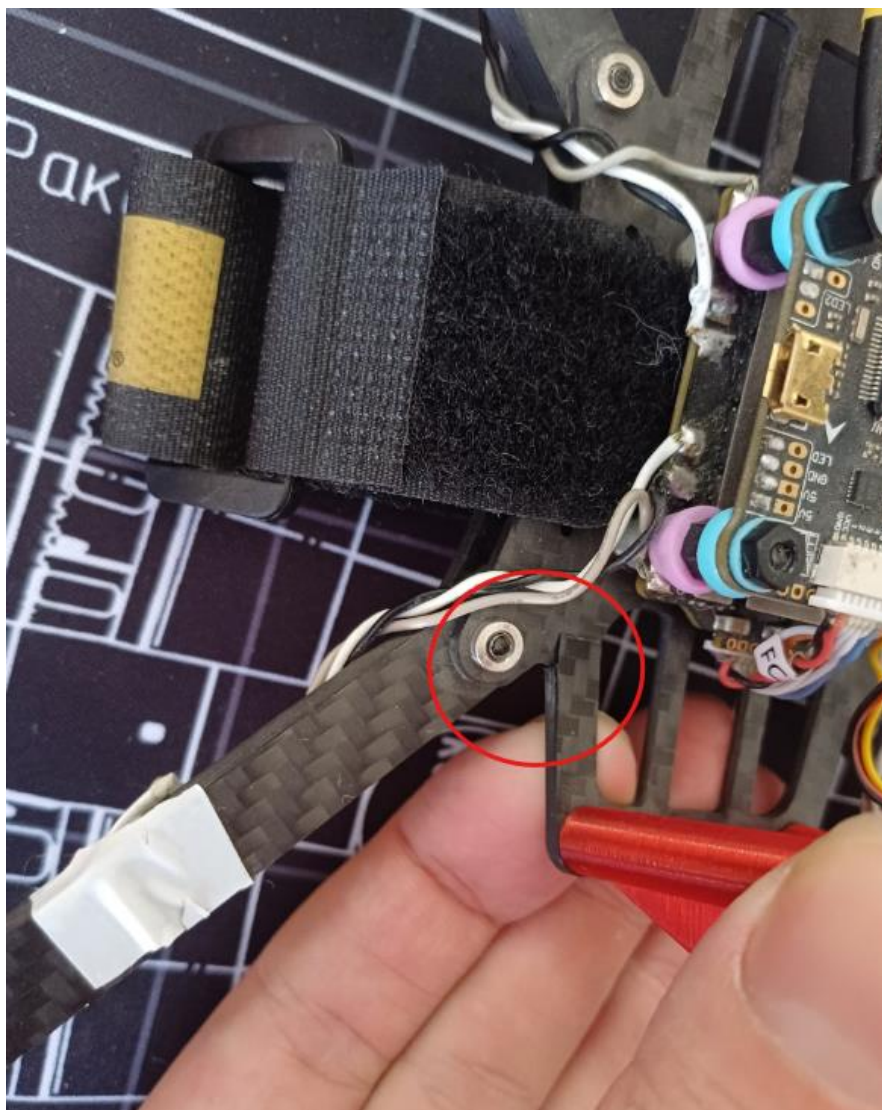


Рисунок 1 – Трещина шасси БПЛА

Развитие аддитивных технологий открывает возможность создания индивидуально адаптированных упругодемпфирующих элементов из полимерных материалов с программируемыми механическими свойствами. Особый интерес представляют решётчатые структуры (lattice structures) на основе термопластичного полиуретана (TPU). За счёт варьирования топологии ячейки, её размера и относительной плотности можно в широких пределах изменять жёсткость, энергопоглощение и упругое восстановление элемента [1–3]. Градиентные структуры, в которых геометрические параметры меняются по высоте, позволяют реализовать оптимальный закон нарастания усилия при ударе, избегая пиковых перегрузок [4, 5].

Цель данной работы – разработать методику проектирования и провести экспериментальную оценку энергопоглощающих элементов шасси БПЛА на основе градиентных решётчатых структур из TPU, полученных методом послойного наплавления (FDM/FFF). В задачи входило:

- разработать набор цифровых моделей с различными типами ячеек и градиентным распределением размера ячеек;
- изготовить образцы и провести их испытания на сжатие;

1. Материалы и методы

1.1. Материал и технология изготовления

Для изготовления образцов использовался коммерческий TPU-филамент марки KINGROON (производитель Китай) с твёрдостью по Шору 95А. Печать выполнялась на принтере Flashforge Adventurer 5M с диаметром сопла 0,6 мм, высотой слоя 0,2 мм. Температура экструзии 235 °С, температура стола 70 °С. Для обеспечения качественного сцепления слоёв и минимизации внутренних напряжений все образцы печатались в ориентации, при которой направление слоёв совпадало с направлением приложения нагрузки.

1.2. Геометрия образцов

Были спроектированы три модели шасси (рисунок 1.1) и три семейства решётчатых структур (рисунок 1.2):

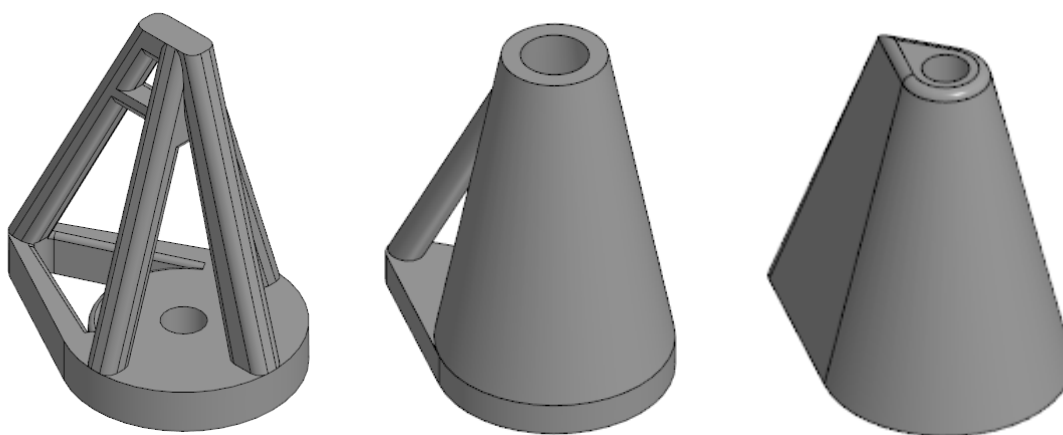
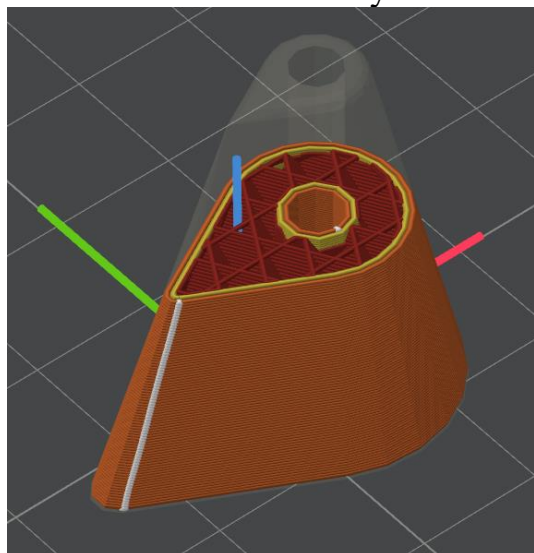
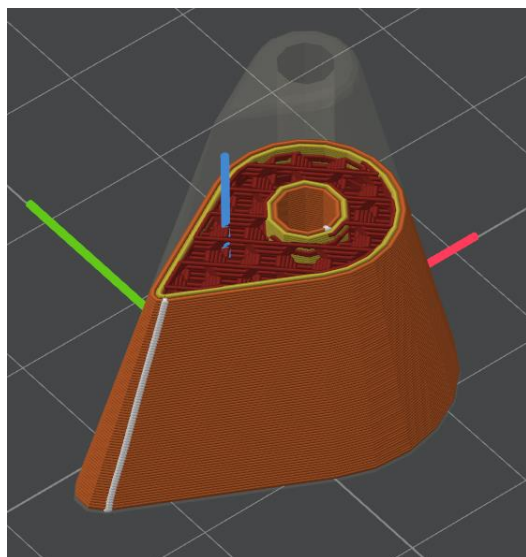


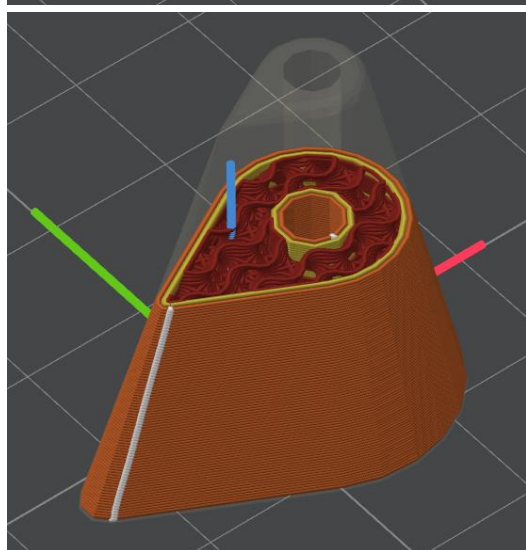
Рисунок 1.1 – Исполнения шасси БПЛА



Тип А



Тип В



Тип С

Рисунок 1.2 – Три исполнения решётчатых структур

Тип А – кубическая ячейка с центральным узлом (simple cubic, SC);

Тип В – октаэдрическая ячейка (octet-truss, ОТ);

Тип С – гибридная структура с горизонтальными связями между вертикальными стойками (lattice with horizontal reinforcements).

Для каждого типа были созданы три модификации:

1. однородные (размер ячейки постоянный по высоте, относительная плотность 20 %);
2. линейно-градиентные (размер ячейки увеличивается от 2 мм в нижней части до 4 мм в верхней, относительная плотность изменяется от 25 % до 12 %);
3. симметрично-градиентные (наименьший размер ячейки в средней части, наибольший – у торцевых поверхностей).

Размеры всех образцов: длина $\times$ ширина $\times$ высота = 30 $\times$ 20 $\times$ 30 мм. Толщина стенок элементов подбиралась таким образом, чтобы обеспечить заданный

диапазон относительной плотности (10–25 %). Проектирование выполнено в Компас 3D v21, экспорт в формат STL с последующей нарезкой в OrcaSlicer.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Влияние топологии ячейки

На рисунке 3 представлены типичные диаграммы деформирования для образцов типа А, В и С с одинаковой относительной плотностью (20 %). Все кривые демонстрируют характерное для полимерных решёток поведение: линейно-упругий участок, плато (зона стабильного смятия) и участок уплотнения. Наиболее протяжённое плато наблюдается у образцов типа С (гибридная структура с горизонтальными связями), что указывает на повышенную способность поглощать энергию при сохранении целостности. Для типа А (кубическая ячейка) после достижения пикового напряжения происходит резкое падение усилия из-за потери устойчивости вертикальных стоек.

Значения удельной энергии поглощения SEA при 60 % деформации составили:

тип А – $1,9 \pm 0,2$ кДж/кг;

тип В – $2,3 \pm 0,2$ кДж/кг;

тип С – $2,6 \pm 0,2$ кДж/кг.

2.2. Эффект градиентного изменения размера ячейки

Введение градиента (линейного и симметричного) позволило изменить характер деформирования. Линейно-градиентные образцы (с увеличением ячейки кверху) демонстрируют более плавное нарастание напряжения без резкого пика, что снижает пиковое ускорение, передаваемое на корпус БПЛА. Для симметрично-градиентных структур (с минимальным размером ячейки в средней части) наблюдается наивысший коэффициент восстановления ERR (до 86 % для типа С), так как деформации концентрируются в средней зоне, где материал работает преимущественно упруго.

В таблице 1 сведены основные характеристики для наиболее эффективной конфигурации – гибридной структуры типа С с симметричным градиентом.

Таблица 1. Показатели энергопоглощения гибридной симметрично-градиентной структуры (тип С)

Параметр	Значение
Масса образца, г	$8,6 \pm 0,3$
Относительная плотность, %	16,5 (средняя)
Начальный модуль упругости Е, МПа	$4,7 \pm 0,3$
SEA при $\varepsilon=60$ %, кДж/кг	$2,8 \pm 0,2$
ERR (цикл до 30 %), %	84 ± 2

2.3. Воспроизводимость и влияние технологических факторов

Анализ результатов пяти образцов для каждой конфигурации показал коэффициент вариации SEA не более 8 %, что свидетельствует о приемлемой повторяемости процесса FDM-печати для TPU. Основными источниками разброса являлись вариации межслойной адгезии и частичное заполнение объёма в зонах с малыми размерами ячеек (<2 мм). Для обеспечения стабильных свойств в рабочем диапазоне рекомендовано ограничить минимальный размер ячейки 2,5 мм при печати соплом 0,6 мм.

3. Применение в конструкции шасси БПЛА

На основе полученных данных была спроектирована и изготовлена посадочная опора для мультироторного БПЛА взлётной массой 4,5 кг (рисунок 4). Энергопоглощающий элемент выполнен в виде цилиндрической колонны с симметричным градиентом ячеек (тип С). Моделирование динамики посадки с использованием явного конечно-элементного анализа показало, что при вертикальной скорости 2 м/с пиковое ускорение, передаваемое на платформу с полезной нагрузкой, снижается на 57 % по сравнению со стандартным полиуретановым амортизатором цилиндрической формы. При этом энергия поглощения распределяется по объёму решётки более равномерно, исключая локальные зоны пластической деформации.

Закключение:

В работе предложен и экспериментально обоснован подход к созданию энергопоглощающих элементов шасси БПЛА на основе аддитивно изготовленных решётчатых структур из TPU. Установлено, что:

Гибридная топология ячейки с горизонтальными связями обеспечивает наиболее высокие значения удельной энергии поглощения (до 2,8 кДж/кг) и стабильное плато деформирования.

Применение симметричного градиента размера ячейки позволяет повысить коэффициент упругого восстановления до 86 %, что важно для многократного использования амортизаторов.

Технология FDM-печати TPU обеспечивает приемлемую воспроизводимость свойств (коэффициент вариации SEA < 8 %) при условии соблюдения рекомендованных геометрических ограничений.

Полученные результаты открывают возможность интеграции адаптивных посадочных устройств в конструкцию БПЛА различного назначения, в том числе для эксплуатации в арктических, морских и городских условиях.

Список литературы:

Wang, Z., Zhang, J., & Lu, G. (2022). Mechanical properties of thermoplastic polyurethane lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *Additive Manufacturing*, 56, 102–115. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102915.

Dalaq, A. S., & Abueidda, D. W. (2024). Energy absorption and recovery of TPU lattices with controlled density gradients. *Materials & Design*, 220, 110–123. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.110123.

Гусев, А. И., Смирнов, Н. В., & Федотов, М. Ю. (2024). Влияние топологии ячеек на энергопоглощающие свойства полимерных решетчатых структур,

полученных методами аддитивных технологий. Инженерный журнал: наука и инновации, (3), 45–58.

Петров, С. В., & Кузнецов, А. А. (2023). Применение термопластичного полиуретана в авиационных амортизирующих элементах. Вестник Московского авиационного института, 30(2), 112–121.

ASTM D695-15 (2020). Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Shen, J., Zhou, Y., & Wang, H. (2023). Crashworthiness design of gradient lattice structures for unmanned aerial vehicle landing gears. Aerospace Science and Technology, 132, 108–119. DOI: 10.1016/j.ast.2022.108119.