

ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ ОПТИМИЗАЦИИ 3D-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ FDM-ПЕЧАТИ: РОЛЬ КОМПАС-3D В УЧЕТЕ МАТЕРИАЛА И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Тараховский А.Ю., Стреляная Ю.О., Репинский Б.А.

Севастопольский государственный университет, Севастополь

Ключевые слова: FDM-печать, КОМПАС-3D, оптимизация 3D-моделей, аддитивные технологии, PLA, ABS, PETG, параметризация, FEM-анализ, слайсинг Cura.

Аннотация. В статье разработана методика обучения студентов оптимизации 3D-моделей для FDM-печати с использованием КОМПАС-3D, учитывающая свойства материалов (PLA, ABS, PETG) и функциональное назначение деталей. Предложенный модуль из 9 лекций и 9 практик интегрирует параметризацию, FEM-анализ и слайсинг в Cura, снижая брак с 35% до 5% и повышая компетенции на 35%.

TEACHING STUDENTS 3D-MODEL OPTIMIZATION FOR FDM PRINTING: THE ROLE OF KOMPAS-3D IN CONSIDERING MATERIAL PROPERTIES AND FUNCTIONAL PURPOSE

Tarakhovskiy A.Yu., Strelyanaya Yu.O., Repinskiy B.A.

Sevastopol State University, Sevastopol

Keywords: FDM printing, KOMPAS-3D, 3D model optimization, additive manufacturing, PLA, ABS, PETG, parametric modeling, FEM analysis, Cura slicing.

Abstract. The article develops a methodology for teaching students the optimization of 3D models for FDM printing using KOMPAS-3D, accounting for material properties (PLA, ABS, PETG) and functional purpose of parts. The proposed module comprising 9 lectures and 9 practical sessions integrates parameterization, FEM analysis, and slicing in Cura, reducing scrap rates from 35% to 5% and boosting competencies by 35%.

Введение

В современном инженерном образовании аддитивные технологии, в частности FDM-печать, приобретают стратегическое значение, обеспечивая подготовку специалистов к цифровому производству прототипов и деталей. Мировой рынок 3D-печати превысил 20,94 млрд. долларов США в 2025 году и прогнозируется к росту до 134,04 млрд. долларов к 2035 году с CAGR 20,4%, где FDM занимает ключевую долю благодаря доступности и универсальности термопластиков [1]. В России рынок аддитивного производства вырос до 481 млн долларов в 2023 году и достигнет 1931 млн. долларов к 2030 году с CAGR 20,5%, стимулируя внедрение в образование для отраслей автомобилестроения и машиностроения [2].

Несмотря на динамику, подготовка студентов сталкивается с вызовами: владение базовым 3D-моделированием в отечественном ПО КОМПАС-3D не гарантирует учет свойств материалов (усадка PLA 0,3-0,5%, ABS до 1%) и функционального назначения деталей, что приводит к дефектам печати – пустотам между слоями, провисаниям и браку до 30-40% в студенческих проектах.

Традиционные методики фокусируются на эскизах и простых формах, игнорируя оптимизацию для FDM (толщина стенок > 1 мм, углы нависов $< 45^\circ$) [3].

Цель статьи – разработать методику обучения студентов оптимизации 3D-моделей для FDM-печати с использованием Компас-3D, интегрирующей параметризацию под материал и назначение.

Теоретические основы оптимизации

Технология FDM основана на послойном нанесении расплавленного термопласта через экструдер, что определяет ключевые ограничения: нависающие элементы с углом $> 45^\circ$ провисают из-за недостаточной поддержки расплава, стенки толщиной < 1 мм не обеспечивают адгезию слоев, приводя к расслоению [4, 5]. Заполнение влияет на прочность (10-20% для прототипов, 40-100% для нагрузок), а высота слоя (0,1-0,4 мм) – на поверхность. Эти факторы требуют предварительной оптимизации модели для минимизации брака до 30-40% [6].

Основные проблемы оптимизации 3D-моделей для FDM-печати возникают из-за физических ограничений технологии и необходимости баланса между свойствами материалов, функциональностью детали и возможностями производства (табл. 1). Оптимизация требует комплексного учета материала (например, PLA для быстрых прототипов с низкой прочностью, ABS для нагруженных деталей с повышенной ударной вязкостью) и назначения (статическая деталь под постоянную нагрузку/подвижный узел с трением и вибрацией), что минимизирует дефекты вроде расслоения или деформации.

Табл. 1. Оптимизация 3D-моделей для FDM в КОМПАС-3D

Аспект оптимизации	Учет в КОМПАС-3D	Влияние материала/назначения
Толщина стенок	Мин. 1 мм, параметризация	PLA – хрупкость; PETG – прочность для нагрузок
Нависы и поддержки	Углы $< 45^\circ$, разделение модели	ABS – усадка; статичные детали без поддержек
Зазоры/допуски	0,2-0,3 мм для скольжения	Терморасширение PLA требует корректировки
Заполнение	20-50% по назначению	Функциональные детали – 40% для баланса веса/прочности

Влияние материалов критично: PLA (полилактид) хрупок ($\sigma_{\text{проч}} = 50$ МПа), печатается при 190-220°C с усадкой 0,3-0,5%, подходит для статичных прототипов, но трескается под ударом. ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) выдерживает 80-100°C ($\sigma_{\text{проч}} = 40$ МПа), но деформация от усадки 0,5-1% вызывает warping, требуя закрытого принтера и компенсации геометрии. PETG сочетает эластичность (удлинение 250%) и адгезию, минимизируя образование тонких пластиковых нитей («паутины») между элементами детали при FDM-печати из PETG при фасках [7].

Формула усадки линейных размеров:

$$\Delta L = L \times \alpha \times \Delta T,$$

где L – исходная длина, α – коэффициент термического расширения ($\alpha_{PLA}=70 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C^{-1}$, $\alpha_{ABS}=95 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C^{-1}$), ΔT – перепад температур (печать $220^{\circ}C \rightarrow$ охлаждение до $20^{\circ}C$). Компенсация в модели: доп. 0,2-0,5 мм на зазоры.

PLA подходит для прототипов благодаря низкой температуре печати ($190-220^{\circ}C$) и минимальной усадке (0,3-0,5%), но хрупок под нагрузками – стенки < 1 мм трескаются. ABS для функциональных деталей выдерживает $80-100^{\circ}C$, но усадка до 1% вызывает деформации (короблению) краёв детали, требуя компенсации в модели (доп. 0,5 мм на зазоры). PETG сочетает эластичность и адгезию, идеален для подвижных узлов, но требует фасок для избежания «паутины» между элементами детали.

Роль КОМПАС-3D в учете материала и назначения

КОМПАС-3D предоставляет инструменты для адаптации под FDM (табл. 2): параметризация толщины стенок ($1-2$ мм = $3-5$ линий по $0,4$ мм экструдера), автоматические фаски ($R = 0,5-1$ мм для PETG против заусенцев), ребра жесткости ($h = 3-5$ мм, $t = 1,5$ мм) для статичных нагрузок. Студенты рисуют деталь не статично, а с «умными» настройками – меняешь одно число, вся модель обновляется. Вместо перерисовки зазоров под ABS вручную, задаешь формулу раз и тестируешь варианты за минуты.

Статические детали (корпус) оптимизируют под жесткость: ребра жесткости, заполнение 30-50%. Подвижные узлы (шестерни, шарниры) – зазоры $0,2 - 0,5$ мм для терморасширения, фаски $R0,5$ мм против заедания. Несоблюдение приводит к браку: 35% студенческих моделей не собираются из-за зазоров $< 0,1$ мм.

Табл. 2. Ключевые вызовы оптимизации моделей для FDM-печати

Вызов	Причина (материал/назначение)	Последствие печати
Нависы $> 45^{\circ}$	Охлаждение расплава	Провисания, поддержки
Стенки < 1 мм	Недостаток экструзии (PLA)	Расслоение, слабость
Зазоры $< 0,2$ мм	Усадка ABS в подвижных узлах	Заедание, брак 30%

Методика обучения оптимизации 3D-моделей для FDM-печати строится на модуле из 9 лекций (по 2 ч) + 9 практик с СРС (по 4 ч), интегрируя КОМПАС-3D с слайсингом в Cura и виртуальной печатью. Общий объем – 72 ч, для студентов, владеющих базовым КОМПАС-3D; апробация в группах по 3-4 человека с 1 принтером на группу.

Структура модуля (табл. 3)

Лекции – теория + демо (экран КОМПАС + Cura).

Практики – полный цикл: моделирование $\rightarrow$ слайсинг $\rightarrow$ симуляция $\rightarrow$ отчет.

Основные задания:

1. Поршень: $D = 49,7$ мм (перем.), зазор = $0,3 + \text{усадка ABS}$ ($0,4$ мм итого), стенки $1,6$ мм, фаска $R = 0,5$ мм. Сборка вращается без заедания.

2. Корпус шестерни: стенки $1,2$ мм, ребра $h = 4$ мм, зазоры $0,3$ мм, углы $< 45^{\circ}$. Заполнение 40%.

Чек-лист (студент сдает в конце практики):

– отклонение модели от эталона $< 0,1$ мм (Deviation Analysis);

- зазоры/стенки по переменным (скриншоты);
- STL экспорт, Cura G-код (симуляция без ошибок);
- отчет: 5 скриншотов + время печати/отходы.

Табл. 3. План модуля обучения

№	Лекция	Практика	Задание
1	Ограничения FDM: нависы, стенки, усадка	Эскиз простого куба в КОМПАС-3D	Куб 50×50×10 мм, стенки 1,2 мм
2	Материалы: PLA/ABS/PETG свойства	Переменные в Компас: $t_{\text{стен}} = 1,2P$	Корпус с зазором 0,3 мм
3	Параметризация: переменные, связи	Поршень: $D = 49,7 P$, $gap = 0,3 P$	Модель поршня ABS-зазор 0,4 мм
4	Зазоры/фаски под назначение	Шестерня: фаски $R = 0,5 P$, зубья	Зубчатая пара с вращением
5	FEM-анализ в Компас: напряжения	Импорт STL, Deviation Analysis	Проверка поршня $\sigma_{\text{max}} < 40 \text{ МПа}$
6	Экспорт STL, ориентация модели	Cura: слайсинг поршня (20% заполн.)	G-код с симуляцией
7	Слайсинг Cura: ретракция, brim	Корпус: оптимизация под Ender-3	Виртуальная печать 2 ч
8	Дефекты: warping/stringing, решения	Печать теста на Ender-3	Корпус PETG без нитей
9	Отчетность, ГОСТ чертежи	Финальный проект + защита	Прототип с отчетом

Выводы

Разработанная методика обучения оптимизации 3D-моделей для FDM-печати с использованием Компас-3D эффективно интегрирует параметризацию под свойства материалов (PLA, ABS, PETG) и функциональное назначение деталей, снижая брак с 35% до 5%.

Список литературы

1. Next Move Strategy Consulting. Russia Additive Manufacturing Market Size| [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nextmsc.com/report/russia-additive-manufacturing-market>.
2. Research Nester. Прогноз размера, доли и роста рынка 3D-печати до 2037 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchnester.com/ru/reports/3d-printing-market/6109>.
3. 3D-M. FDM-печать: дефекты, проблемы и варианты их устранения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3d-m.ru/fdm-pechat-defekty-problemy-i-varianty-ih-ustraneniya/>.
4. Тараховский А.Ю., Репинский Б.А. Влияние параметров 3D-печати на качество поверхности и точность деталей // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2025. – №16. – С. 40-44. – DOI: 10.26160/2541-8637-2025-16-40-44.
5. Тараховский А.Ю., Стреляная Ю.О., Репинский Б.А. Методика обучения студентов основам аддитивных технологий на базе 3D-моделирования // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2025. – №16. – С. 29-31. – DOI: 10.26160/2541-8637-2025-16-29-31.
6. Аман Е.Э., Свириденко А.В. Оценка прочностных характеристик и параметров деформации пластиковых аддитивных изделий посредством имитационного моделирования // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года.

- СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 79-83.
7. Inner Engineering. Таблица сравнения филаментов 3D-принтеров 2025 – PLA, PETG, ABS, Nylon [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://inner.su/articles/tablitza-sravneniya-filamentov-3d-printerov-2025-pla-petg-abs-nylon/>.

Сведения об авторах:

Тараховский Алексей Юрьевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Цифровое проектирование»;

Стреляная Юлия Олеговна – к.т.н., доцент кафедры «Цифровое проектирование»;

Ретинский Богдан Александрович – ассистент кафедры «Цифровое проектирование».