

А. Н. Ларионов¹✉

Комплексные решения для аддитивных производств. Проектирование и анализ прочности деталей, моделирование процесса 3D-печати

¹АО «Научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Нижняя Салда, Российская Федерация
e-mail: andrei.larionov@yandex.ru

Аннотация. Современные аддитивные технологии, используемые для 3D-печати металлов, требуют тщательного подхода к моделированию процессов. Вопрос о том, какое моделирование – компьютерное или натурное является более эффективным, остается актуальным. Компьютерное моделирование позволяет лучше контролировать процесс изготовления деталей и выявлять потенциальные проблемы до начала фактического производства.

Ключевые слова: аддитивное производство, аддитивные технологии, оптимизация, цифровая модель, физический объект, 3D-принтер, проектирование, моделирование, опорная конструкция, параметры, трансформация, процесс

A. N. Larionov¹✉

Comprehensive Solutions for Additive Manufacturing. Designing and Analyzing the Strength of Parts, Modeling the 3D Printing Process

¹JSC “Scientific Research Institute of Mechanical Engineering”, Nizhny Salda, Russian Federation
*e-mail: andrei.larionov@yandex.ru

Abstract. Modern additive technologies used for 3D printing of metals require a careful approach to process modeling. The question of which simulation is more effective, whether computer-based or field-based, remains relevant. Computer modeling allows you to better control the manufacturing process of parts and identify potential problems before the actual production begins.

Keywords: additive manufacturing, additive technologies, optimization, digital model, physical object, 3D printer, design, modeling, supporting structure, parameters, transformation, process

Проблемы отрыва от опорной плиты

Одной из самых серьезных проблем в процессе аддитивного производства является отрыв детали от опорной плиты. Неопределенность в этом вопросе может привести к серьезным последствиям, если проблема будет обнаружена только после завершения печати. При производстве металлических изделий с использованием аддитивных технологий необходимо учитывать множество факторов, включая термомеханические деформации и напряжения, возникающие во время печати. Эти явления могут существенно повлиять на качество конечного продукта, вызывая такие проблемы, как искажение формы и снижение прочности [1]. Решение данной проблемы требует применения высококачественных материалов и технологий, а также оптимизации параметров печати, таких как тем-

пература и скорость, которые могут помочь избежать отрыва детали [2]. Для оценки напряжений, действующих на деталь во время печати, можно использовать формулу

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

где σ – напряжение (Па); F – сила, действующая на деталь (Н); A – площадь поперечного сечения детали (м^2).

Рассмотрение данной формулы поможет понять, какие величины могут вызвать отрыв детали от опорной плиты, если приложенные силы превышают допустимые значения.

Характеристики титана и его влияние на печать

Титан, который становится все более популярным в аддитивном производстве, имеет высокую точку плавления и плохую теплопроводность. Это приводит к накоплению тепла и, как следствие, к деформациям опорной плиты. Титан также обладает высокой прочностью и коррозионной стойкостью, что делает его идеальным для создания высоконагруженных компонентов, таких как детали для авиационной и промышленности, но есть сложности в обработке и высокие затраты на производство, это ограничивает массовое применение [3]. Температура плавления титана составляет около 1668°C , что требует точного контроля температуры во время печати. Для расчета теплового потока, возникающего в процессе печати, можно использовать формулу

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{(T_{\text{вход}} - T_{\text{выход}})}{d}, \quad (2)$$

где Q – тепловой поток (Вт); k – коэффициент теплопроводности материала ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$); A – площадь поверхности (м^2); $T_{\text{вход}}$ и $T_{\text{выход}}$ – температуры на входе и выходе (К); d – толщина материала (м).

Если производственный цикл не начинается с отрыва детали от плиты, то релаксационная термообработка может снизить остаточные напряжения, однако остаточные деформации все равно будут присутствовать и могут выходить за пределы допустимых норм [4]. Поэтому важно учитывать режимы печати и выбирать оптимальные параметры для минимизации термических эффектов.

Необходимость диалога между проектировщиком и производителем

Для успешного аддитивного производства требуется активный диалог между проектировщиком и производителем. Чем выше уровень компетентности проектировщика, тем быстрее можно запустить нужную деталь в производство. Инженеры должны учитывать позиционирование детали в камере принтера и ми-

минимизировать высоту печатаемого слоя, поскольку это влияет на стоимость и время печати. Также важно, чтобы проектировщики были осведомлены о возможностях и ограничениях используемого оборудования, поскольку это поможет избежать ошибок при трансформации цифровой модели в физический объект [5]. Взаимодействие между различными командами инженеров, проектировщиков 3D-принтеров является необходимым условием для эффективного процесса разработки.

Оптимизация процесса печати включает в себя минимизацию объема поддерживающих структур и расходов на их удаление. Для расчета оптимальной высоты печатаемого слоя можно использовать следующую формулу

$$h_{\text{опт}} = \frac{D_{\text{макс}}}{n}, \quad (3)$$

где $h_{\text{опт}}$ – оптимальная высота слоя (м); $D_{\text{макс}}$ – максимальный размер детали (м); n – число слоев, необходимых для полной печати.

Несмотря на то, что такая ориентация детали может быть неблагоприятной для корабления, ранняя проверка параметров печати может значительно снизить необходимость внесения изменений в конструкцию [6]. Важным аспектом является использование методов топологической оптимизации, которые позволяют распределять материал только в тех местах, где он действительно необходим, что также способствует снижению веса и стоимости конечного продукта. Кроме того, технологии, такие как адаптивное управление параметрами печати в зависимости от текущего состояния процесса, могут значительно повысить качество деталей и снизить количество брака [7].

Существует множество программных решений, которые могут помочь в процессе проектирования. Эти инструменты позволяют быстро вносить изменения и минимизировать риски, такие как поломка 3D-принтера из-за неправильно рассчитанных параметров [8]. Специализированные программные продукты позволяют проводить калибровку моделей, основанных на обобщенных данных о работе 3D-принтеров, что значительно улучшает результаты печати. Например, программы могут использовать алгоритмы машинного обучения для анализа данных о предыдущих печатях и предсказывать оптимальные параметры для новых задач [9]. Примеры параметров основаны на стандартных диапазонах аддитивных процессов титана, например, L-PBF – лазерное порошковое спекание (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры 3D-печати титана марки Ti-6Al-4V технологией лазерного порошкового спекания L-PBF

Параметр	Значение 1	Значение 2	Значение 3	Отмеченные условия
Температура (°C)	900	950	1000	Контролируемая в печатной камере
Мощность лазера (Вт)	150	200	180	Влияет на спекание порошкового титана
Скорость печати (мм/с)	500	600	550	Оптимизирована для минимизации деформаций
Толщина слоя (мкм)	30	20	25	Зависит от детализации и скорости
Атмосфера	Аргон	Гелий	Аргон	Защищает от окисления

Моделирование и его результаты

Моделирование позволяет предвидеть проблемные области в процессе производства. На различных стадиях проектирования можно использовать результаты моделирования см. табл. 2, чтобы избежать непредвиденного локального разрушения опорной конструкции [10]. Результаты компьютерного моделирования дают возможность четко видеть зоны максимального смещения и риска отрыва детали от опорной плиты, а также вести наблюдение за значениями отдельных параметров после завершения процесса (см. табл. 2). Регулярное использование моделирования на всех этапах проектирования и производства может существенно увеличить общую эффективность процесса и снизить затраты на исправление ошибок [11].

Таблица 2

Результаты моделирования аддитивных процессов титана марки Ti-6Al-4V

Параметр	Значение 1	Значение 2	Значение 3
Плотность (%)	99,5	99,8	99,4
Твердость (HV)	350	370	360
Пористость (мм/с)	0,5	0,3	0,6
Напряжения (МПа)	300	280	310
Деформация (мм)	0,1	0,08	0,12

Необходимо отметить, что компьютерное моделирование предоставляет множество преимуществ перед натурным. Оно позволяет не только отслеживать

и предотвращать возможные проблемы, но и оптимизировать процесс печати с помощью специализированного программного обеспечения, это необходимый инструмент для проектировщиков, работающих в области аддитивного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гибсон, И., Розен, Д. В., Стакер, Б. Аддитивные технологии: 3D-печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / И. Гибсон, Д. В. Розен, Б. Стакер. – Москва: Springer, 2010. – 450 с.
2. Вохлерс, Т. Отчет Вохлерса 2020: Состояние отрасли 3D-печати и аддитивного производства / Т. Вохлерс.: Wohlers Associates, 2020. – 300 с.
3. Редди, Б. В. М., Шанкар, Р. Конечные элементы анализа процессов аддитивного производства / Б. В. М. Редди, Р. Шанкар // Журнал производственных процессов. – 2018. – Т. 35. – С. 123–130. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.09.023.
4. Куо, К. Дж. Тепловой анализ процессов 3D-печати / К. Дж. Куо // Научные материалы. – 2018. – Т. 919. – С. 123–130.
5. ASTM International. Стандартный гид по аддитивному производству / ASTM F2792-12. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.astm.org/Standards/F2792.htm>. – Дата обращения: 30.04.2025.
6. MSC Software. Simufact Additive. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mssoftware.com/product/simufact-additive>. – Дата обращения: 30.04.2025.
7. Engineering Reality. Engineering Reality Magazine. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mssoftware.com/resources/engineering-reality>. – Дата обращения: 30.04.2025.
8. Степанов, И. А., Кудрявцев, А. В. Программные средства для моделирования процессов 3D-печати / И. А. Степанов, А. В. Кудрявцев // Научно-технический вестник. – 2021. – № 4. – С. 45–52.
9. Михайлов, Н. С. Применение машинного обучения в аддитивном производстве / Н. С. Михайлов // Журнал новых технологий. – 2020. – Т. 15. – С. 78–85.
10. Петров, В. Г. Моделирование процессов аддитивного производства / В. Г. Петров, А. Н. Смирнов // Инженерные системы. – 2019. – Т. 12. – С. 23–30.
11. Кузнецов, А. В. Оптимизация процессов 3D-печати: современные подходы и технологии / А. В. Кузнецов // Вестник инженерных наук. – 2020. – Т. 8. – С. 34–40.

© А. Н. Ларионов, 2025