

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите
Директор ВШТМиМФ,
д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН
А. М. Кривцов
«___» _____ 2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

магистерская диссертация

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА 3D ПЕЧАТИ

По направлению подготовки

01.04.03 «Механика и математическое моделирование»

Направленность

01.04.03_03 Механика и цифровое производство

Выполнил

студент гр. 5040103/00301

<подпись>

В. Д. Вараев

Руководитель

к.ф.-м.н., доцент ВШТМиМФ

<подпись>

О. С. Лобода

Санкт-Петербург

2022

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Физико-механический институт

Высшая школа теоретической механики и математической физики

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШТМиМФ

А.М. Кривцов

« » _____ 2022 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту Вараеву Владиславу Дмитриевичу, группы 5040103/00301

1. Тема работы: Конечно-элементное моделирование процесса 3D печати.
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 01.06.2022.
3. Исходные данные по работе: Научные статьи по теме работы, книги по методу конечных элементов, механики сплошных сред, характеристики 3D принтера и его сопла, свойства пластика, используемого для печати.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
Литературный обзор статей об аддитивном производстве, методе конечных элементов в 3D печати и постановка задачи.
Рассмотрение различных методов 3D печати с выявлением наиболее удобного для валидации результатов расчёта остаточных напряжений и деформаций в детали. Выбор материала детали и опор.
Выбор геометрии детали и её расположения в камере печати. Расчёт тестовой модели
Расчёт остаточных напряжений и деформаций из-за остывания на реальной детали, основанный на нестационарном уравнении теплопроводности и законах баланса. Оценка рассчитанных значений остаточных напряжений и деформаций в сравнении с реальными данными.
Сравнение результатов для рассматриваемых моделей.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): геометрии моделей, ориентации в камере печати, результаты топологических оптимизаций, температурные распределения, деформации и напряжения в теле
6. Консультанты по работе: А.В. Смирнов
7. Дата выдачи задания 13.05.2022.

Руководители ВКР

_____ (подпись)

О.С. Лобода

_____ инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 13.05.2022.

_____ (дата)

Студент

_____ (подпись)

В.Д. Вараев

_____ инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

31 с., 30 рисунков

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, 3D ПЕЧАТЬ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ.

Тема выпускной квалификационной работы: «Конечно-элементное моделирование процесса 3D печати».

Данная работа посвящена рассмотрению процесса моделирования 3D печати и получения поля напряжений, деформирования от предполагаемой формы детали из-за остывания.

Задачи, которые решались в ходе исследования:

- Подтвердить, что изменение температуры вызывает тепловые деформации в материале, а ограничение теплового расширения приводит к появлению напряжений.
- Симуляция этапов аддитивного производства на тестовой геометрии с использованием пакета конечно-элементного моделирования Ansys
- Проведение исследования с моделированием процесса послойной печати для детали из ABS пластика. Получение полей распределения температур, остаточных напряжений и деформаций при различных ориентациях детали в камере печати с последующей верификацией.

Были получены поля распределения температур для каждого слоя печати на тестовой модели после проведения топологической оптимизации и на модели из ABS пластика. Также были рассчитаны остаточные напряжения и деформации в детали после остывания.

Были подтверждено следующее: изменение температуры вызывает тепловые деформации в материале, а ограничение теплового расширения приводит к появлению напряжений. Получены результаты расчётов при разных ориентациях модели, описывающей послойную печать в пакете Ansys, в камере печати.

ABSTRACT

31 pages, 30 figures

KEYWORDS: ADDITIVE MANUFACTURING, 3D PRINTING, FINITE ELEMENT METHOD, RESIDUAL STRESS AND DEFORMATION.

The theme of the graduate qualification work: "Finite element modeling of the 3D printing process."

This work is devoted to the study of the process of 3D printing modeling and obtaining a stress field, deformation from the expected shape of the part due to cooling.

Tasks that were solved in the course of the study:

- Confirm that a change in temperature causes thermal deformations in the material, and the limitation of thermal expansion leads to the appearance of stresses.
- Simulation of additive manufacturing steps on test geometry using Ansys finite element modeling package.
- Carrying out a study with modeling of the layer-by-layer printing process for a part made of ABS plastic. Obtaining temperature distribution fields, residual stresses and deformations at different orientations of the part in the print chamber with subsequent verification.

Temperature distribution fields were obtained for each print layer on a test model after topological optimization and on a model made of ABS plastic. Also, residual stresses and deformations in the part after cooling were calculated.

The following has been confirmed: a change in temperature causes thermal deformations in the material, and the limitation of thermal expansion leads to the appearance of stresses. The results of calculations are obtained for different orientations of the model describing layer-by-layer printing in the Ansys package in the print chamber.

Содержание

Введение	5
Глава 1. Теория этапов аддитивного производства в Ansys.	8
Глава 2. Литературный обзор.	14
Глава 3. Симуляция этапов аддитивного производства на тестовой конструкции.....	16
3.1. Анализ нагружения.	17
3.2. Топологическая оптимизация.....	19
3.3. Моделирование аддитивной печати.....	20
Глава 4. Моделирование процесса послойной печати для детали из ABS пластика при различных ориентациях в камере печати.....	26
4.1. Горизонтальная ориентация.	27
4.2. Вертикальная ориентация.....	29
4.3. Ориентация под наклоном.....	31
Заключение	35
Список использованной литературы.....	36

Введение

Из-за быстрого затвердевания расплавленных порошков в процессах аддитивного производства металлов и затвердевания пластмассовых изделий в процессе 3D печати и высокой термической градиенты в конструкции создаются большие остаточные напряжения. Остаточные напряжения, величина которых может превышать предел текучести материала, влияют на коррозионную стойкость, характер роста трещин и усталостные характеристики. Кроме того, остаточные напряжения являются причиной выраженных деформаций особенно для тонкостенных элементов. Поэтому экспериментальное измерение остаточных напряжений и деформаций является необходимым требованием для изготавливаемой детали. В связи с тем, что большое количество переменных величин влияет на процесс аддитивного производства, экспериментальное измерение остаточных напряжений и деформаций достаточно затратно по времени и стоимости. Численные термомеханические модели могут быть использованы для их оценки, но качество расчетов критически зависит от точности расчёта температурного поля, влияющего как на остаточные напряжения, так и на деформацию.

Аддитивное производство определяется как процесс объединения материалов для создания объектов из 3D-модели, обычно слой за слоем. С помощью аддитивного производства можно изготавливать детали сложной геометрии с минимальной потребностью в постобработке из различных материалов (в том числе пластмассы и металла) с почти нулевыми отходами. Уменьшение материалозатрат – одно из главных преимуществ процесса аддитивного производства по сравнению с субтрактивным производством (Рис. 1.). В процессе аддитивного производства данные передаются на производственную машину, которая в итоге превращает инженерный проект в деталь, напечатанную на 3D-принтере. Первоначально АП использовалось как метод быстрого прототипирования - ускоренный метод создания (в основном

пластмассовых) деталей перед их изготовлением по общепринятым методикам, таким как литье, формовка и т.д.

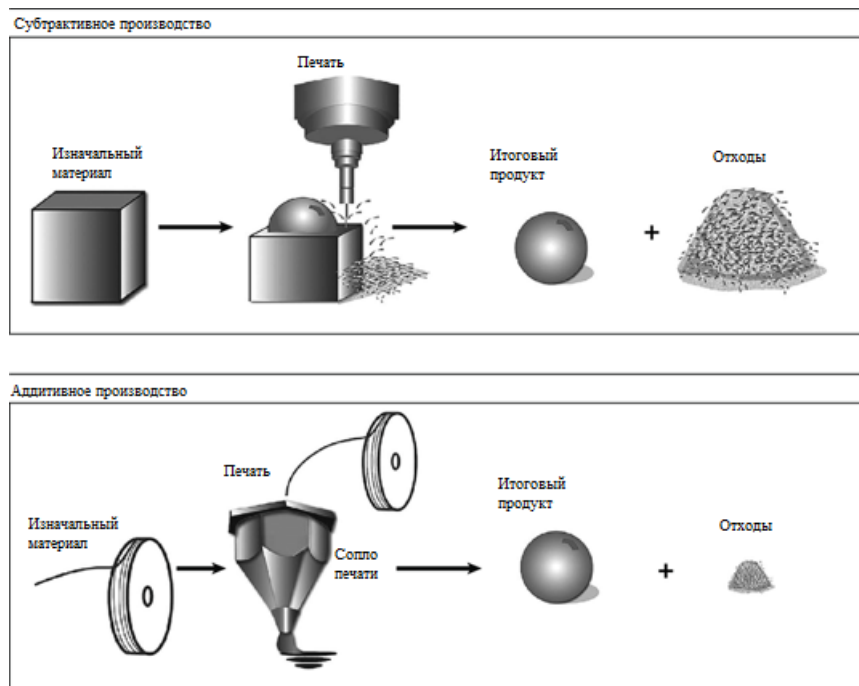


Рис.1. Субтрактивное и аддитивное производства в сравнении.

Обычно детали, напечатанные на 3D-принтере, не являются массовыми, но для экономии времени и материала конструкции выполняются с внутренней ячеистой структурой. Плотность и рисунок заполнения определяются как параметры печати. Такое заполнение позволяет максимизировать соотношение жесткости к весу и значительно уменьшает искажения компонентов, возникающие во время печати и из-за последующего охлаждения. Тем не менее, такой подход имеет недостаток в том, что он не дает конструктору прямого контроля над механическим сопротивлением изготавливаемой детали. Это связано с тем, что морфология внутренней конструкции, толщина стенок и другие характеристики неизбежно оказывают сильное влияние на свойства производимого компонента. Большинство этих параметров выбираются на этапе подготовки к печати с помощью программного обеспечения для нарезки и прямого управления принтером, которое представляет собой машинный код, предназначенный для управления перемещением сопла. В результате у проектировщика фактически нет

необходимых инструментов для прогнозирования поведения конструкции перед печатью. Часто этап проверки выполняется непосредственно уже при полевых испытаниях напечатанных компонентов. Проблема еще больше усложняется зависимостью конечной прочности печатных компонентов от множества других параметров печати и их комбинации. Среди них наиболее влиятельными из этих параметров являются скорость печати, температура сопла, температура базовой плиты, высота слоев, ориентация заполнения и, конечно же, ориентация сборки. Многие исследования проводились с целью демонстрации и анализа влияния одного или нескольких из этих параметров на результирующие механические свойства. В итоге, хоть нить материала, выходящая из сопла изначально изотропна и однородна, можно предполагать, что напечатанные слои ведут себя как ортотропный материал. Но данная работа для получения возможности исследования процесса печати с помощью доступного программного обеспечения предполагает рассмотрение материала готовой печати как изотропного и однородного, без ячеистой структуры.

Основная цель данной работы – рассмотрение моделирования процесса 3Д печати и получение поля напряжений, деформирования от предполагаемой формы детали из-за остывания с использованием оптимизации процесса аддитивного производства в системе конечно-элементного анализа ANSYS.

Глава 1. Теория этапов аддитивного производства в Ansys.

Одним из наиболее доступных и удобных программных продуктов, позволяющих производить инженерный анализ и численное моделирование является пакет конечно-элементного анализа Ansys. Для численного решения инженерных задач в нём используется метод конечных элементов. Он основан на двух идеях: дискретизации исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементной аппроксимации исследуемых функций [18]. Данный метод позволяет исследуемым объектам и конечным элементам иметь любую форму, а исследуемым объектам иметь различную физическую природу. Он даёт возможность исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами. Позволяет решать как стационарные, так и нестационарные задачи, задачи контактного взаимодействия. С этим методом можно моделировать любые граничные условия. Наша задача подразумевает рассмотрение нестационарного процесса для твёрдого деформируемого тела.

Комплексные решения Ansys Additive Suite или Ansys Workbench Mechanical Additive Process Simulation позволяют конструкторам смоделировать полный жизненный цикл изделия – от проектирования, до аддитивного производства. Симуляция цикла аддитивного производства в Ansys представлена несколькими этапами (Рис.2.).



Рис.2. Симуляция цикла аддитивного производства в Ansys.

Весь процесс начинается с создания модели предполагаемой конструкции в Spaceclaim или Designmodeler. Следующим шагом предлагается провести топологическую оптимизацию конструкции с целью

уменьшения итоговой массы детали без потери прочности, что экономически очень выгодно при изготовлении больших партий деталей на производстве. В основе топологической оптимизации в Ansys лежит метод SIMP (solid isotropic material with penalization), он основан на методе распределения плотности при представленных нагрузках и граничных условиях. Для алгоритма оптимизации расчётными переменными являются значения плотности элементов. Итеративный процесс подбирает те значения, которые минимизируют глобальную податливость структуры.

Тот факт, что функция распределения относительной плотности постоянна, даёт нам возможность избегать ошибок, связанных с бинарностью значений. Промежуточную плотность мы получаем, когда варьируем для каждого элемента значение относительной плотности между ρ_{min} и 1. ρ_{min} — это минимальное ненулевое допустимое значение относительной плотности для незаполненных материалом элементов. Такое задание минимального значения позволяет получать стабильные результаты и проводить корректный анализ конечных элементов из-за предотвращения вырожденности матрицы конечных элементов.

Модуль Юнга вслед за непрерывностью изменения относительной плотности материала меняется также непрерывно на каждом элементе. Представляется интерполяционная зависимость, которая являет собой степенной закон вклада относительных плотностей ρ_e в общую жёсткость изотропного материала, записанный для каждого элемента e , где E_0 - модуль Юнга фазы базового материала:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \quad (1.1)$$

Мы снижаем вклад элементов с промежуточными плотностями в жёсткость поправкой на потери p . Чаще всего экспериментально подтверждается, что наиболее подходящее значение поправки $p = 3$. При

уменьшении жесткости элемента уменьшается модуль эластичности. Глобальную жёсткость в методе SIMP получают так:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e, \quad (1.2)$$

где K_e — матрица жесткости элемента, ρ_e — относительная плотность элемента, ρ_{min} — минимальная относительную жесткость, N — количество элементов в модели проектирования, а p — поправка на потери. Цель оптимизации — удалить указанный объем массы, минимизировав податливость структуры или максимизировав общую жесткость структуры.

Показатель общей мягкости или гибкости структуры, который является обратной величиной жесткости, называется податливостью. Энергия деформации или сумма упругости элементов задают глобальные условия податливости. Максимизируя глобальную жёсткость, мы минимизируем глобальную податливость C как обратную величину. Итеративно процесс оптимизации разрешает значения плотности элементов, вносящие вклад в минимизацию глобальной податливости структуры.

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e] [u_e] \quad (1.3)$$

Где $[K_e]$ — собой жесткость элемента e , вектор $\{\rho\}$ состоит из значений относительной плотности элемента ρ_e , а $[u_e]$ — вектор узловых перемещений элемента e .

На каждой итерации оптимизации необходимо, чтобы удовлетворялись условия по общему равновесию сил и жесткости и ограничению массы:

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\} \quad (1.4)$$

$\{u\}$ — вектор, отвечающий за смещение, $[K\{\rho\}]$ — это глобальная матрица жесткости, представленная через вектор относительной плотности, а $\{F\}$ — вектор внешней силы.

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M \quad (1.5)$$

M — целевая масса оптимизации, а v_e представляет собой объем элемента.

Следующим шагом необходимо произвести сглаживание геометрии, прошедшей оптимизацию, поскольку после топологической оптимизации поверхность тела не получается гладкой, а состоит из граней элементов сетки, оставшихся после оптимизации. Далее геометрия отправляется на проверочный расчёт с теми же нагрузками и закреплениями, с которыми она была отдана на оптимизацию, чтобы убедиться в сохранении жёсткости конструкции.

Последние этапы – подготовка к моделированию процесса печати и сама печать. Помощник Additive Wizard, используемый в Ansys при задании параметров расчёта, позволяет импортировать уже готовую геометрию плиты основания в камеру печати (так называемая кровать) или же предоставить её генерацию программе, аналогичный выбор предлагается и при создании поддержек для печати. Ansys способен сам рассчитать проекцию детали на опору для генерации поддержек. Сетку для 3-х мерной модели можно выбрать декартовой – кубические элементы, параметр размера которых можно регулировать, чтобы наиболее хорошо повторить форму детали, тетраэдрической - многослойной сеткой, которая точно соответствует геометрии или воксельной - сетки с возможностью уменьшения влияния свойств материала в случаях, когда геометрия перекрывается вокселями лишь частично. Хорошей практикой при задании высоты элемента сетки является учёт условия, что в один элемент сетки должно входить примерно 3-5 слоёв печати. В камере печати конструкция стоит на опоре, и её основание зафиксировано (это имитация прилипания юбки к столу при 3D печати – деталь не может скользить по столу), поэтому общая деформация формируется из упругой и тепловой (от остывания) деформаций.

$$\varepsilon^{Tot} = \varepsilon^e + \varepsilon^{th} \quad (1.6)$$

Для нашего случая с закреплением основания мы имеем ненулевое напряжение $\sigma \neq 0$. Упругая деформация определяется из закона Гука через тензор жёсткости C :

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^e \quad (1.7)$$

Тепловая деформация считается с коэффициентом теплового расширения α :

$$\varepsilon^{th} = \alpha \Delta T \quad (1.8)$$

Где $\Delta T = T - T_{ref}$ – разница текущей температуры материала T и температуры T_{ref} , при которой тепловые деформации в материале могут быть определены равными 0.

Обычно, расчёты производятся в два этапа. Сначала производится расчёт температурного поля во всей рабочей области детали. Затем посчитанная температура используется в механических расчётах. В ANSYS распределение тепла в материале рассчитывается в блоке Thermal analysis, а тепловые деформации и напряжения - в блоке Structural analysis.

Также для определения температуры тела в любой момент времени используется нестационарное уравнение теплопроводности:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1.9)$$

где k – коэффициент температуропроводности, t – время, T – температура, q - тепловой поток, ρ – плотность материала, c – удельная теплоёмкость.

Таким образом, для расчёта модели в Ansys необходимо подавать следующие параметры исследуемого материала:

- Модуль упругости
- Коэффициент Пуассона

- Плотность
- Коэффициент теплового расширения
- Удельная теплоёмкость
- Температура плавления

А также необходимо задавать параметры принтера:

- Рабочая температура сопла
- Температура предварительного подогрева плиты основания и сопла
толщина
- Толщина слоя печати
- Время между печатью разных слоёв
- Температура, до которой деталь и плита будут остывать
- Угол нависания для поддержек

Глава 2. Литературный обзор.

В научной литературе можно найти множество исследований, посвященных расчёту механических характеристик материалов и печатных деталей, исполненных из композитов. Начиная с простого испытания на растяжение, многие авторы расширяли анализ, изменяя приложенную нагрузку (сжатие, изгиб, сдвиг и кручение) и тип приложения нагружения (усталость, удар и ползучесть). Современные аддитивные технологии уже обладают широкой вариативностью по способам реализации. Среди них широко применяются: Лазерное сплавление [17], лазерная полимеризация [10], экструзия [12,19], струйная печать [11], электронно-лучевое производство [9]. Из всей рассмотренной научной документации удалось найти лишь работы с металлическими материалами в основном с использованием технологии лазерного спекания, а не экструзии пластика с моделированием методом послойного наплавления. Тем не менее, результаты исследований и приведённые в литературе подходы моделирования печати можно учесть для проведения расчётов в нашей работе.

Благодаря последовательному расчёту температуры и напряжений вычисления легко поддаются обработке, но точность вычислений зависит от качества температурного поля термо-физических свойств изделия. Симуляция сложных физических процессов, которые влияют на температурные поля достаточно ресурсозатратна и многие предыдущие расчёты температурных полей подразумевают различные упрощения и предположения для того, чтобы вычисления легко поддавались обработке, так, например, в работе [13] представлена двухмерная модель, а в работе [14] предполагается, что всё тело полностью нагрето и рассматривается его остывание, а в работе [8] вводится предположение об однослойном осаждении. В некоторых расчётах источники тепла для упрощения принимаются поверхностными потоками для ускорения расчётов.

Благодаря проведённому литературному обзору можно понять, какое влияние оказывают введения различных упрощений в модели и какой подход в целом удобнее всего возможно было бы применить для расчёта остаточных напряжений и деформаций в детали по результатам печати.

Глава 3. Симуляция этапов аддитивного производства на тестовой конструкции.

Для расчёта в пакете Ansys в качестве тестовой детали была выбрана модель кронштейна (Рис.3.) из нержавеющей стали (316 Stainless steel) с параметрами модуля упругости, коэффициента Пуассона, плотности, коэффициента теплового расширения, удельной теплоёмкости и температуры плавления, заданными из библиотеки стандартных инженерных данных Ansys:

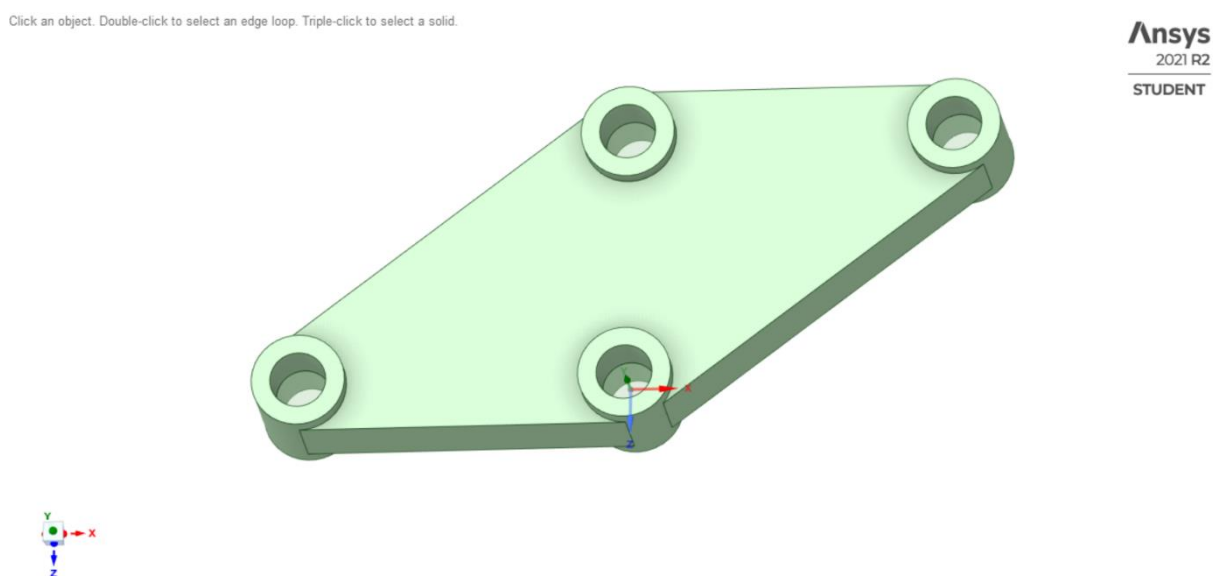


Рис.3. Геометрия тестовой модели

3.1. Анализ нагружения.

К детали были применены закрепления в двух отверстиях (Рис.4.) и нагружающая сила в 15Н, направленная вдоль оси x на другие два отверстия (Рис.5.):

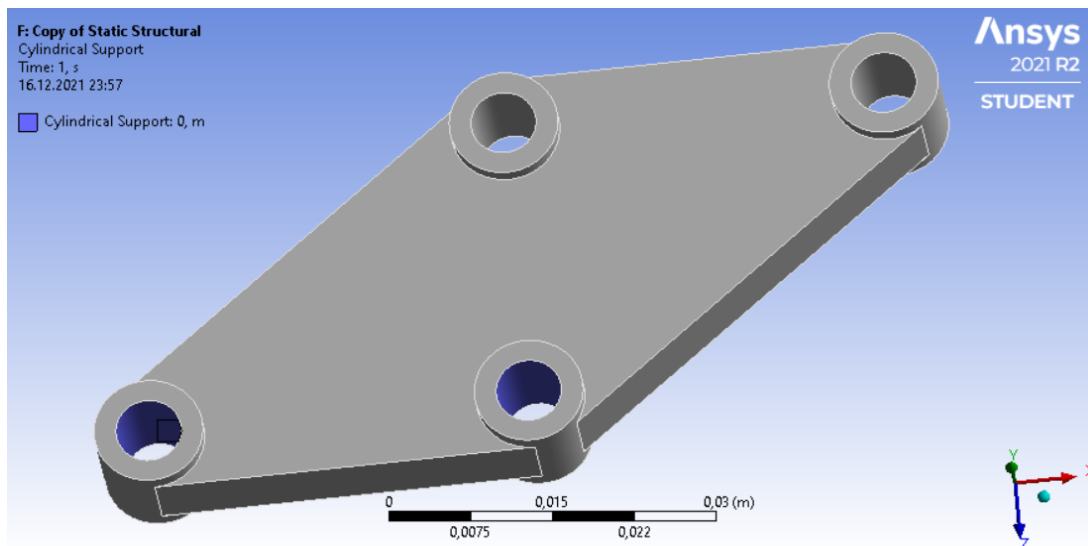


Рис.4. Закрепления в тестовой модели

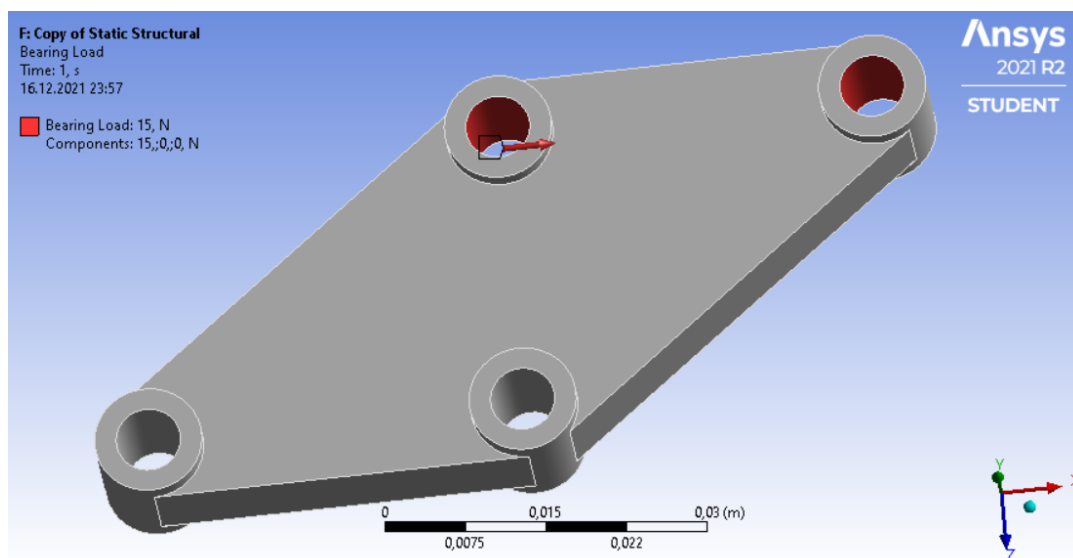


Рис.5. Нагружения в тестовой модели

Была наложена сетка и в результате расчёта были получены следующие распределения деформаций (Рис.6.) и напряжений (Рис.7.):

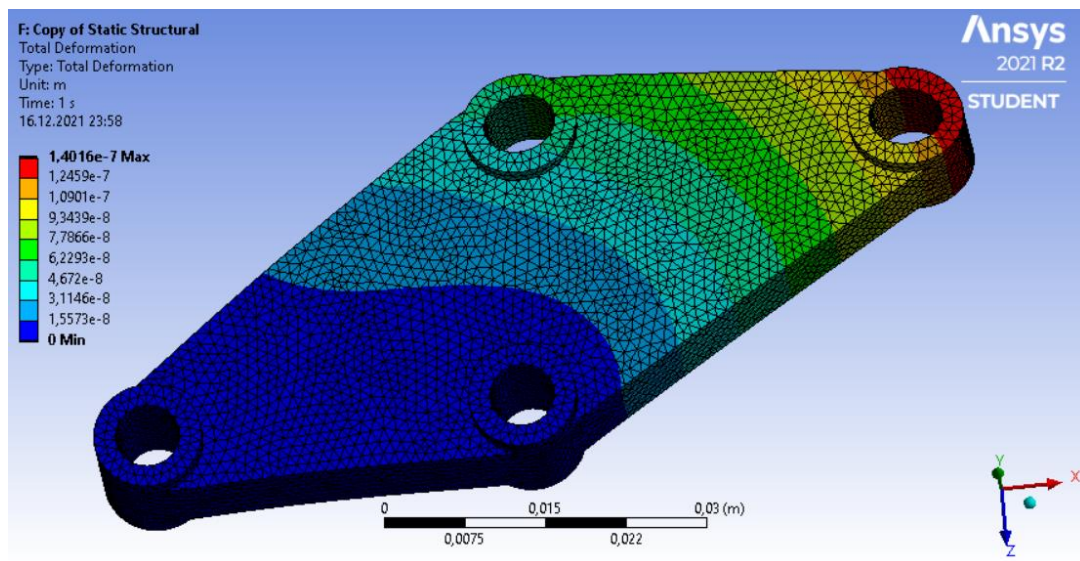


Рис.6. Распределение деформаций в тестовой модели

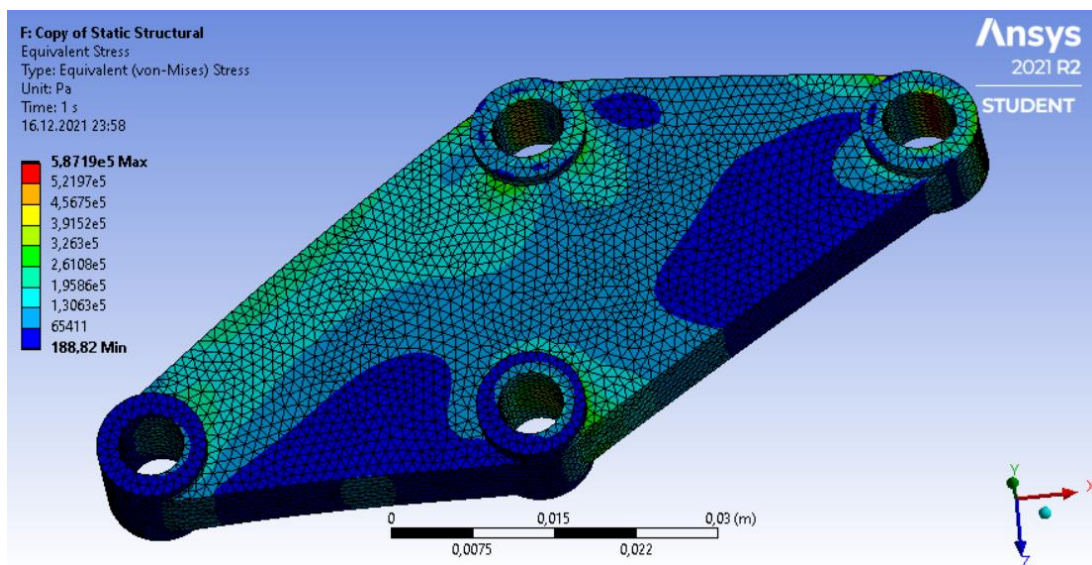


Рис.7. Распределение напряжений в тестовой модели

3.2. Топологическая оптимизация.

Для упрощения модели и уменьшения её массы воспользуемся топологической оптимизацией в ANSYS. Ansys Topology Optimization — это модуль Ansys Mechanical для автоматического выбора оптимальных по массе конструктивных форм с учетом прочности, жесткости, технологических ограничений для аддитивного и традиционного способов производства.

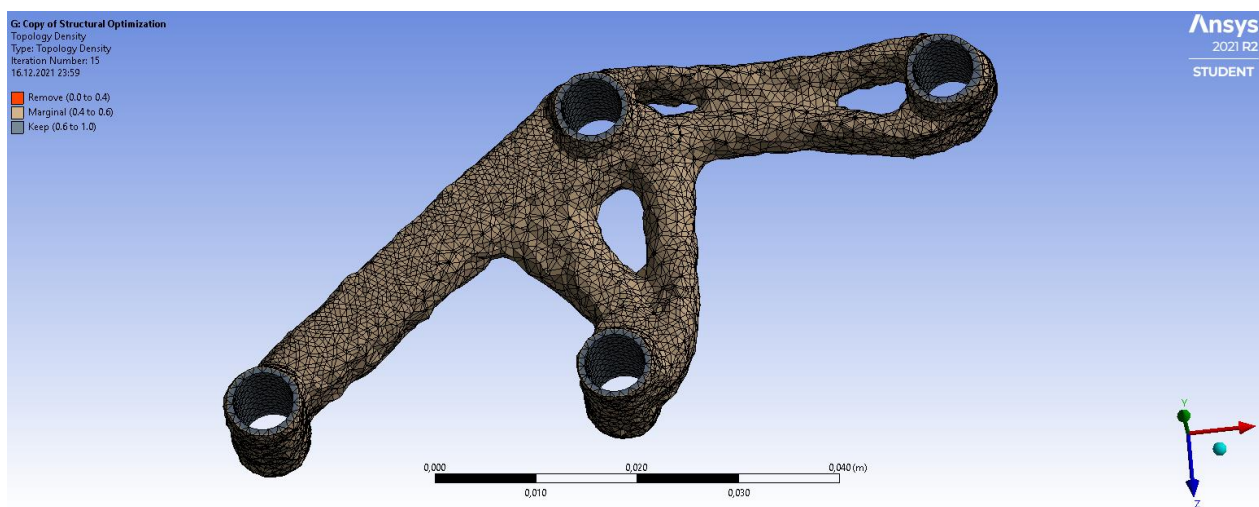


Рис.8. Тестовая модель после проведения топологической оптимизации

Критерием сходимости поставим уменьшение общей массы конструкции до 35% от изначальной.

После оптимизации модель необходимо сгладить для более корректного расчёта.

Select a solid or faceted body then click Complete tool guide to create shrinkwrap.



Ansys
2021 R2
STUDENT

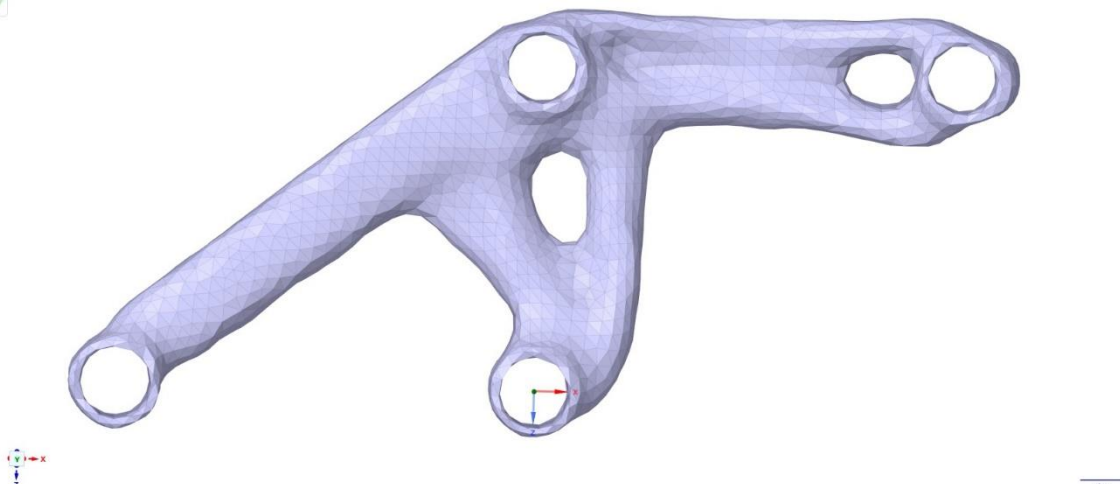


Рис.9. Сглаженная тестовая модель после проведения топологической оптимизации

3.3. Моделирование аддитивной печати.

Для моделирования печати перейдём в ANSYS Mechanical в блок AM Thermal Analysis и добавим в модель подогреваемую опору – плиту, положив на него нашу конструкцию.

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

Ansys
2021 R2
STUDENT

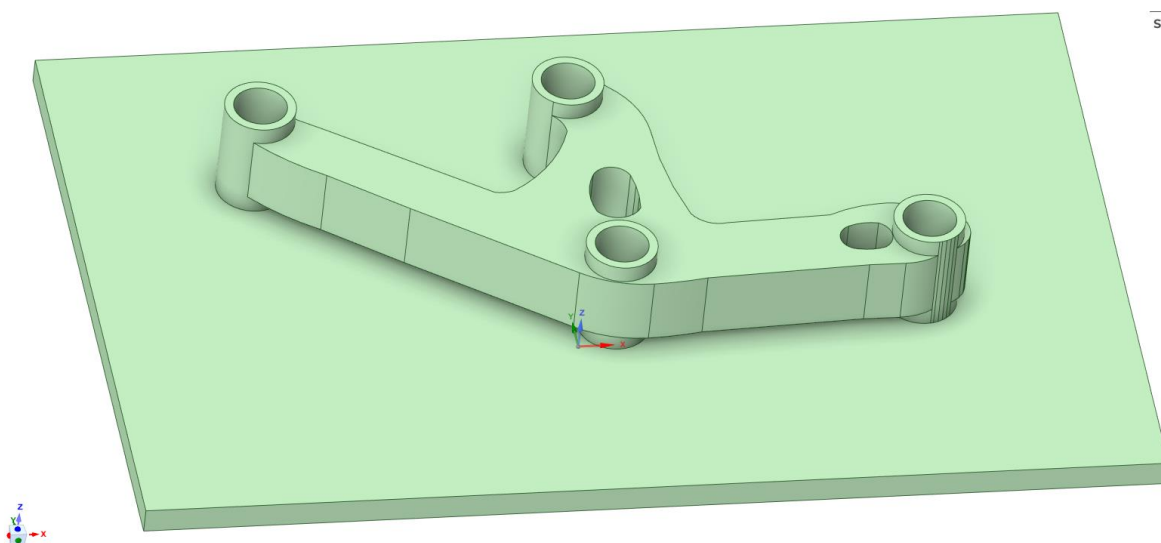


Рис.10. Расположение модели на опоре

Можно увидеть, что ANSYS сам просчитывает проекцию детали на стол для построения поддержек при печати.

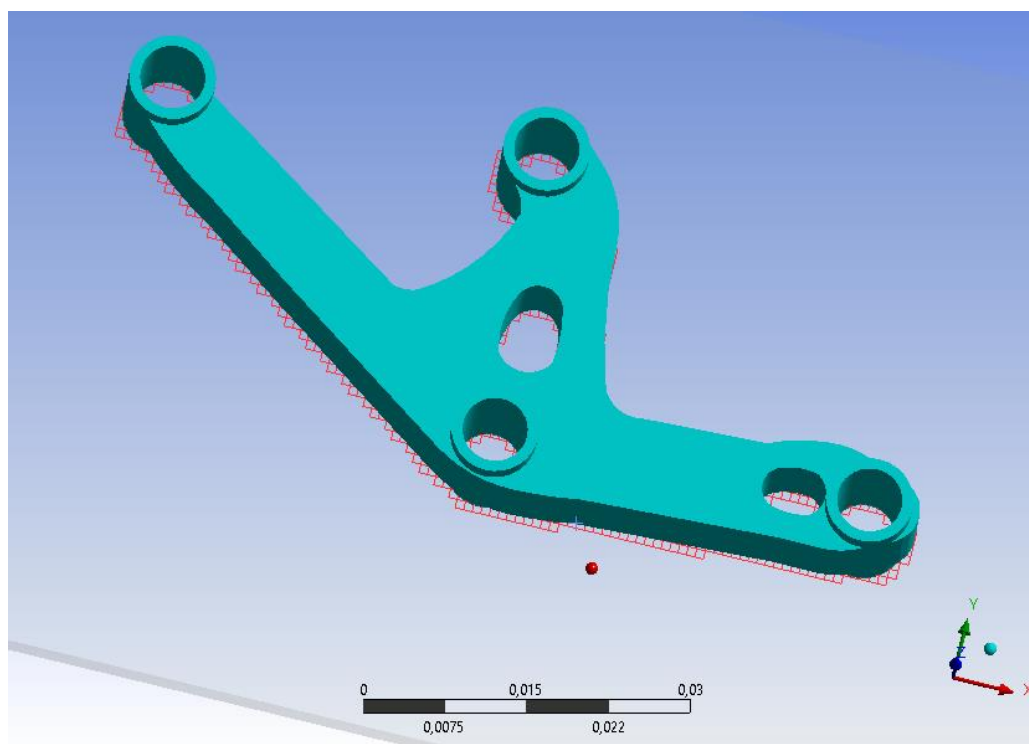


Рис.11. Расчёт проекции детали на опору

Для расчёта этапа печати доступно формирование 3-х-мерной сетки в виде кубических элементарных объёмов - вокселей. Для самого тела сторона куба выбрана равной 1мм, а для опоры – 1,5мм.

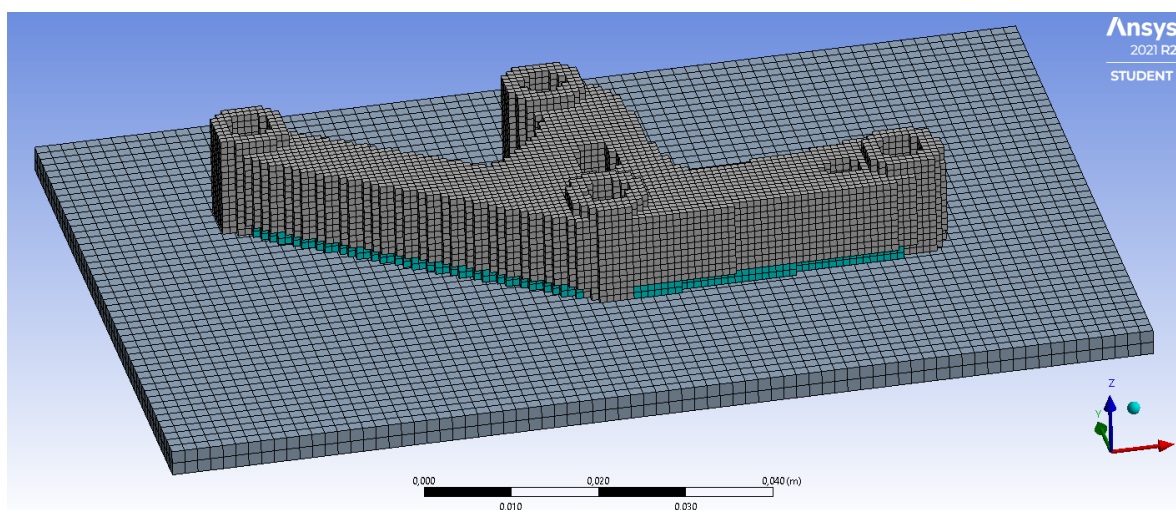


Рис.12. Сетка модели на этапе моделирования печати

Температура, на которую подогревали опору, была задана равной 100°C, комнатная температура была принята равной 22°C.

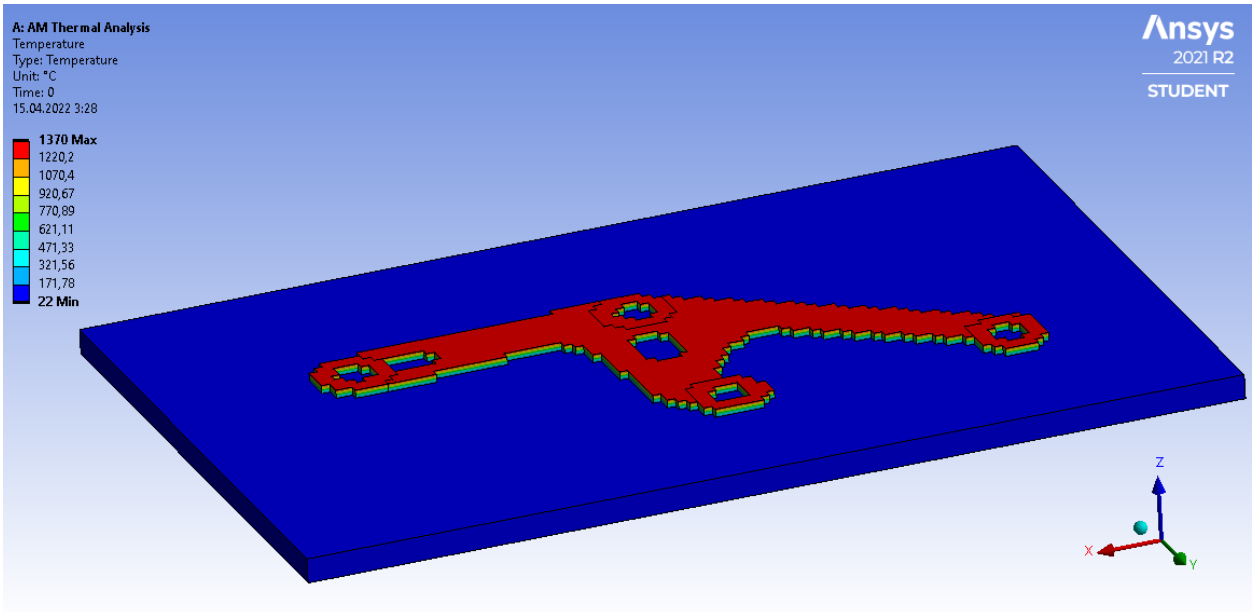


Рис.13. Температурное распределение после печати первого слоя

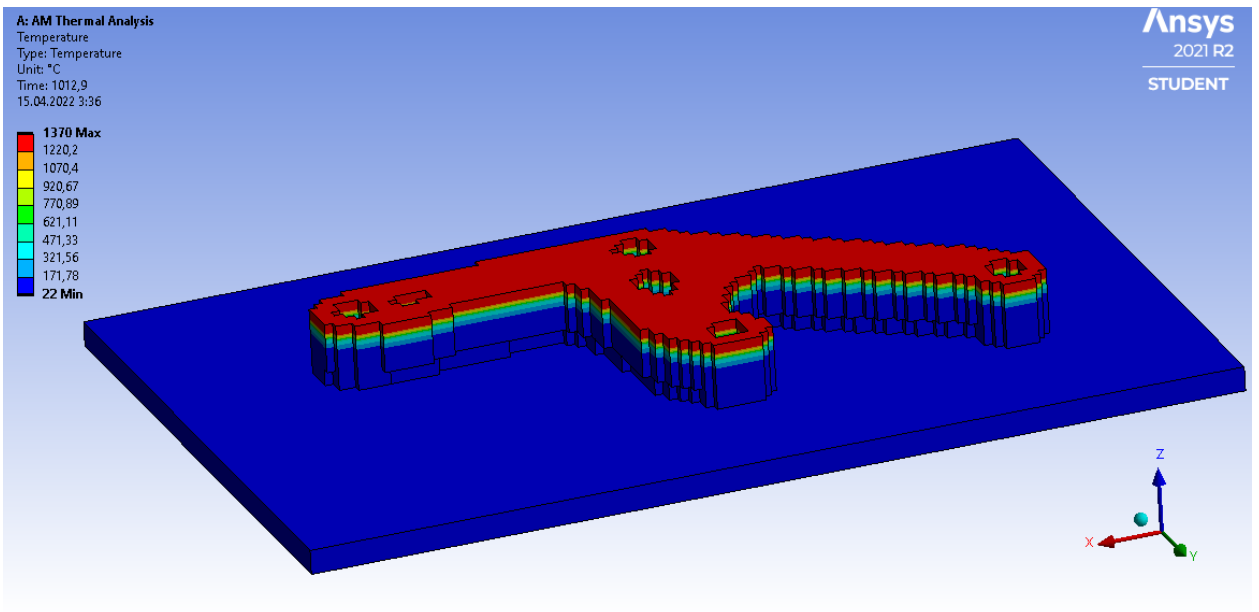


Рис.14. Температурное распределение после печати пятого слоя

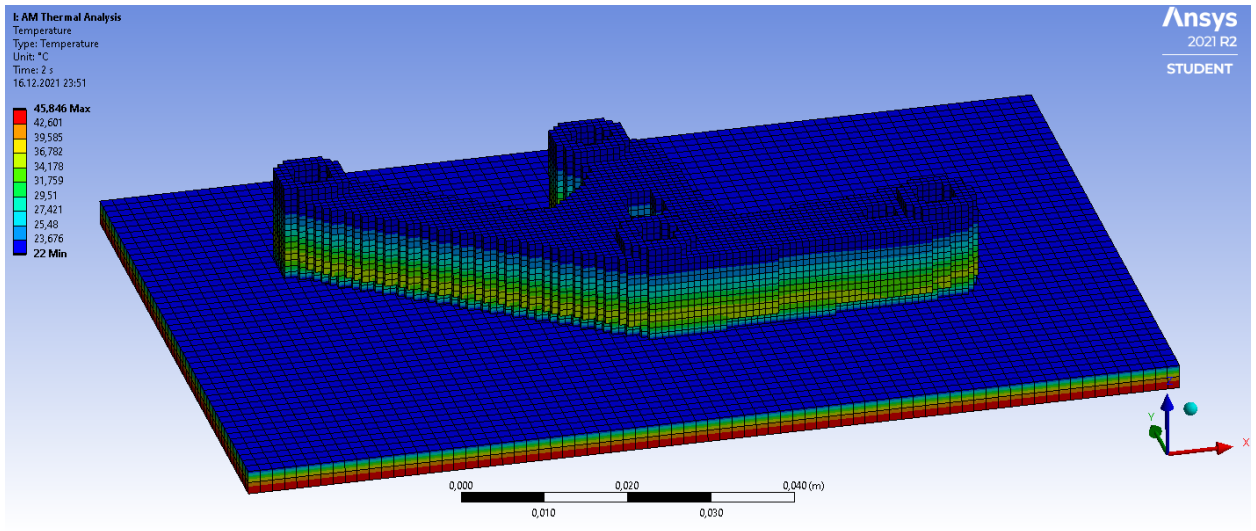


Рис.15. Температурное распределение после отключения подогрева опоры

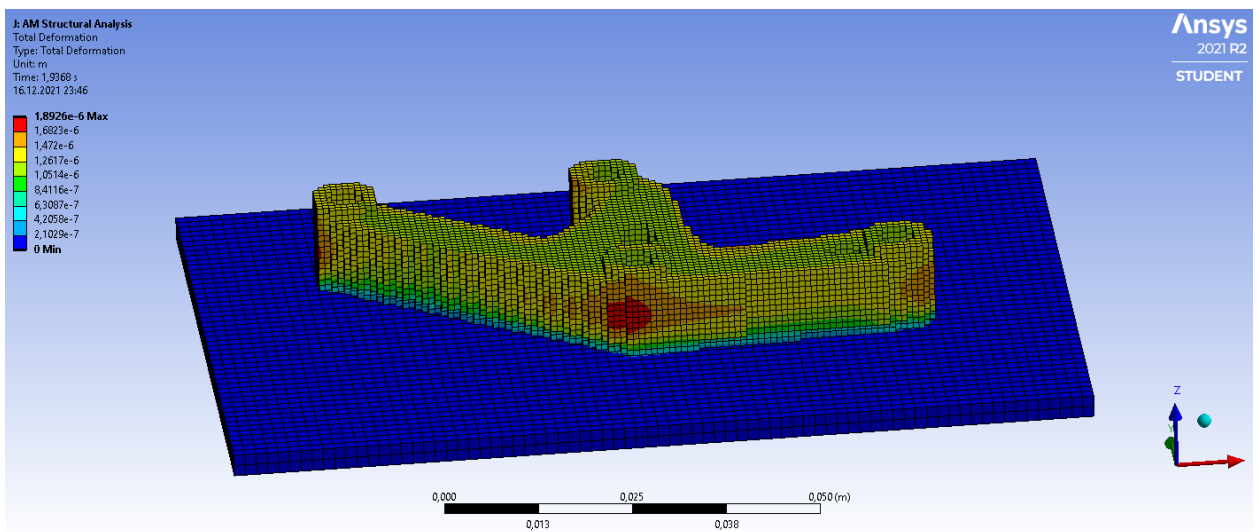


Рис.16. Деформации в теле после отключения подогрева опоры

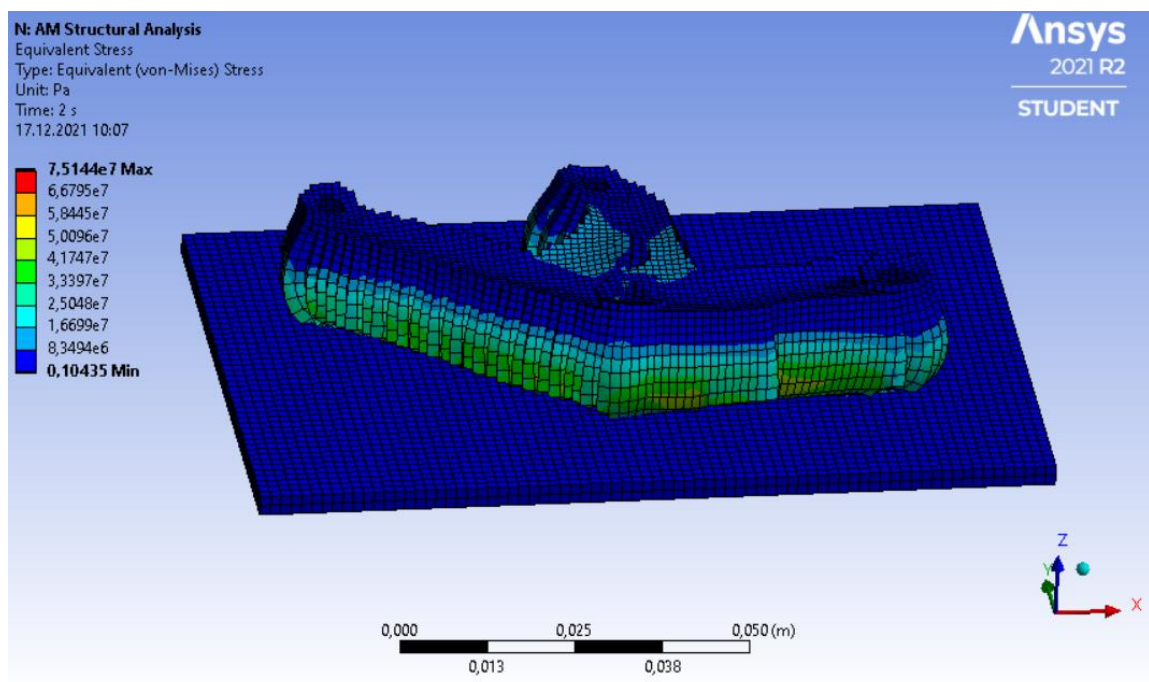


Рис.17. Напряжения в теле после отключения подогрева опоры

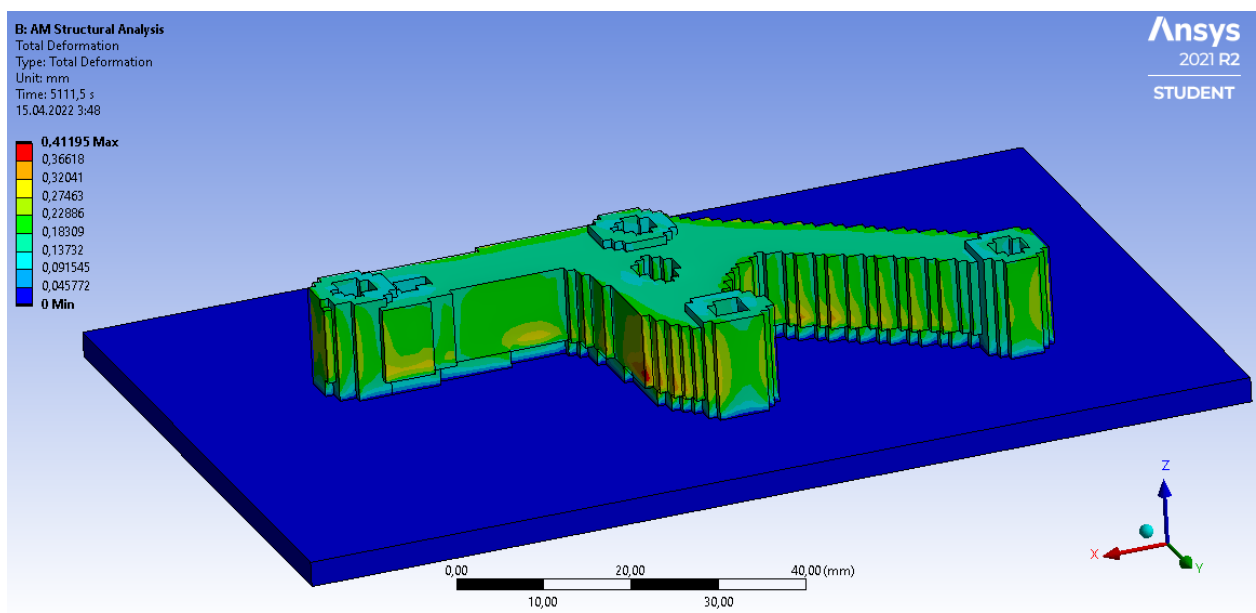


Рис.18. Конечные деформации в детали

Таким образом, можно заметить, что после отключения опоры деформации в детали начинают расти, а каждый новый слой печати даёт

одинаковую максимальную температуру для одинаковых слоёв, что свидетельствует о корректности расчёта послойной печати в Ansys Mechanical.

Глава 4. Моделирование процесса послойной печати для детали из ABS пластика при различных ориентациях в камере печати.

Для расчёта использовались следующие характеристики пластика:

Модуль упругости	2,39E-09 Па
Коэффициент Пуассона	0,399
Плотность	$1040 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Коэффициент теплового расширения	$9,54\text{E-}05 \frac{1}{\text{C}}$
Удельная теплоёмкость	$1720 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{C}}$
Температура плавления	200° C

Табл.1. Характеристики ABS пластика.

И следующие параметры печати:

Рабочая температура сопла	230° C
Температура предварительного подогрева плиты основания и сопла толщина	110° C
Толщина слоя печати	0.2мм
Время между печатью разных слоёв	5 с
Температура, до которой деталь и плита будут остывать	22° C
Угол нависания для поддержек	60°

Табл.2. Параметры печати.

Размер одного конечного элемента детали – 0.6мм, а плиты – 2мм

Для расчёта была выбрана следующая деталь с размерами основания – 32x8мм и с выступом на высоте 10мм с размером основания 28x3мм, высотой 8мм.

Были рассмотрены следующие ориентации детали в камере печати (Рис.18):

- Горизонтальная
- Вертикальная
- Наклон 15°

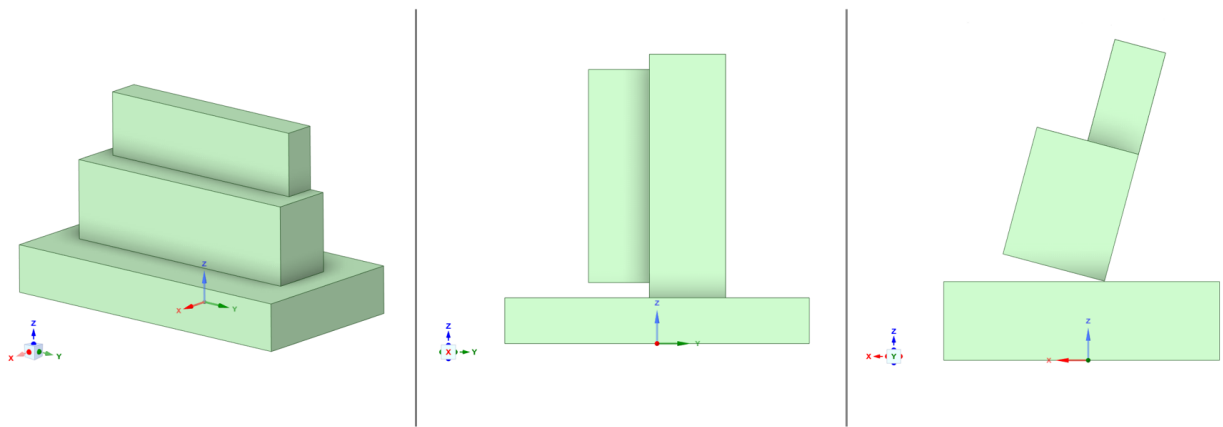


Рис.18. Ориентации детали в камере печати

4.1. Горизонтальная ориентация.

В результате расчёта при горизонтальной ориентации мы получаем следующую зависимость максимальной средней и минимальной температур от времени (Рис.19.):

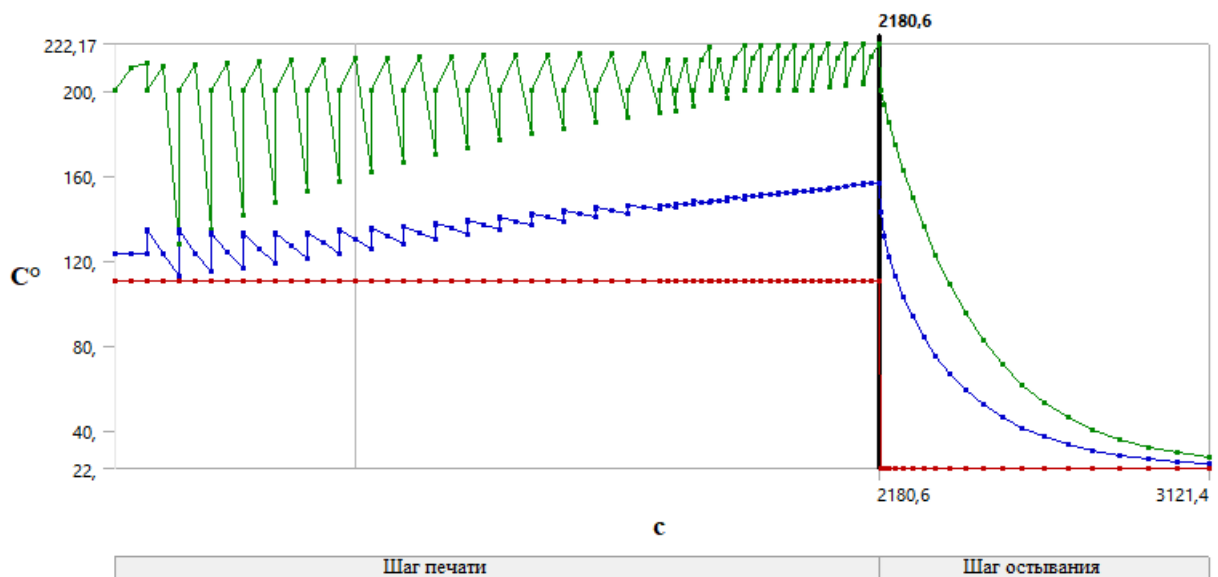


Рис.19. Зависимость максимальной средней и минимальной температур от времени при горизонтальной ориентации детали в камере печати.

Далее получаем распределение температуры в детали (Рис.20.):

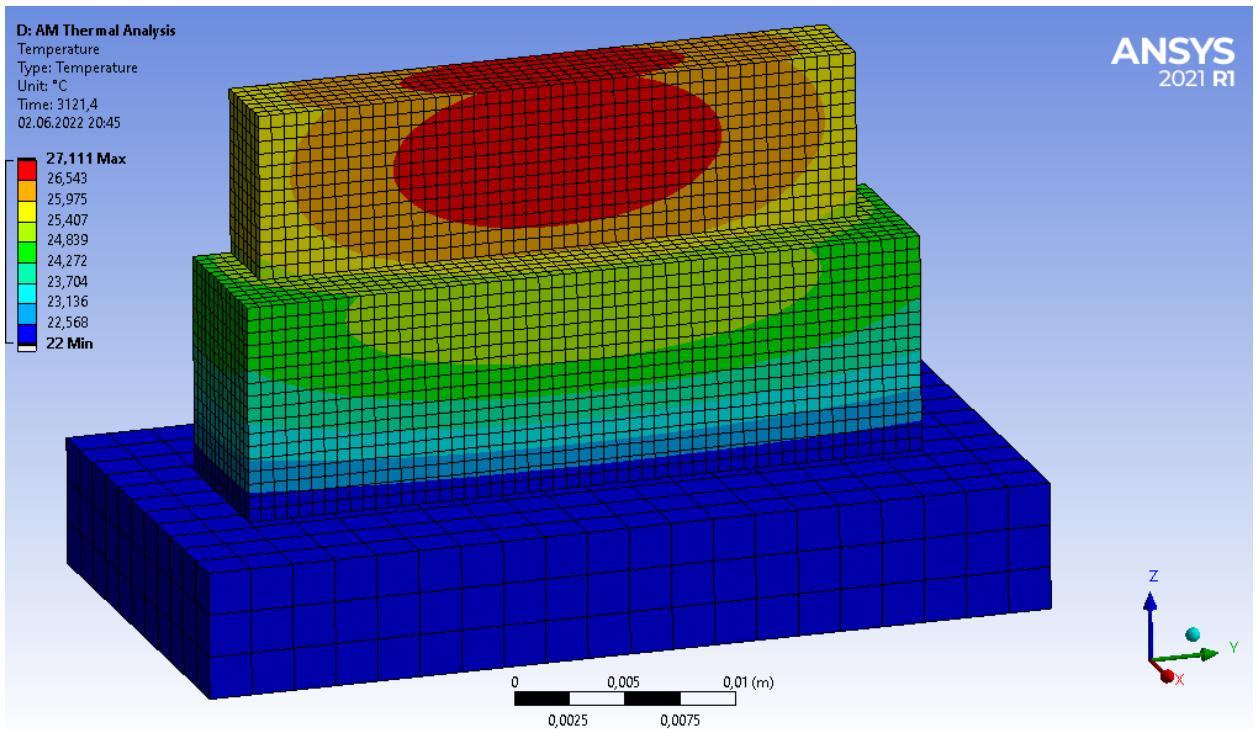


Рис.20. Распределение температуры в детали.

Имеем следующий график зависимости максимальной, средней и минимальной деформаций от времени по окончании расчёта (Рис.21.):

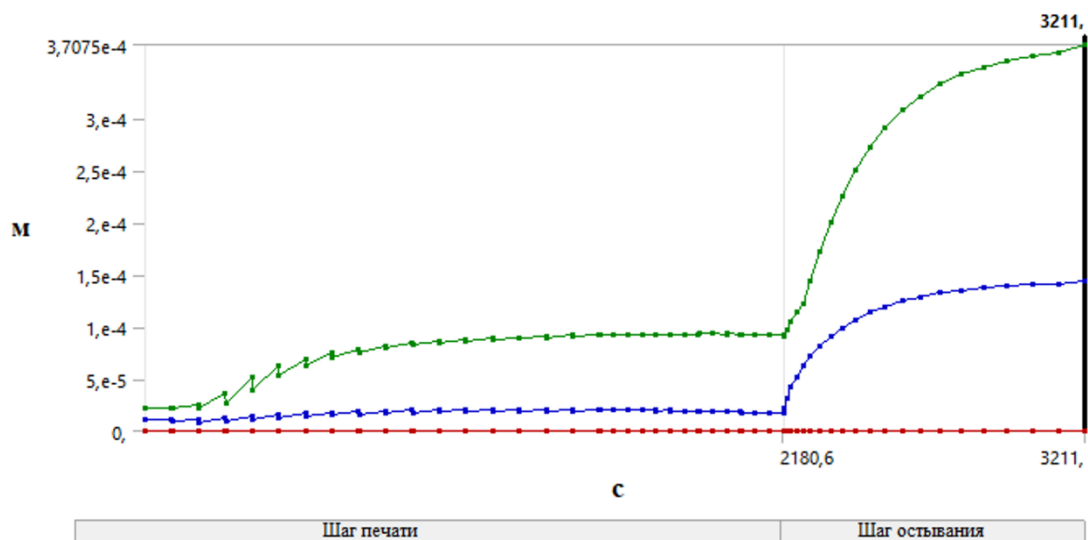


Рис.21. Зависимость максимальной, средней и минимальной деформаций от времени по окончании расчёта

Остаточные деформации в детали при горизонтальной ориентации (Рис.22.):

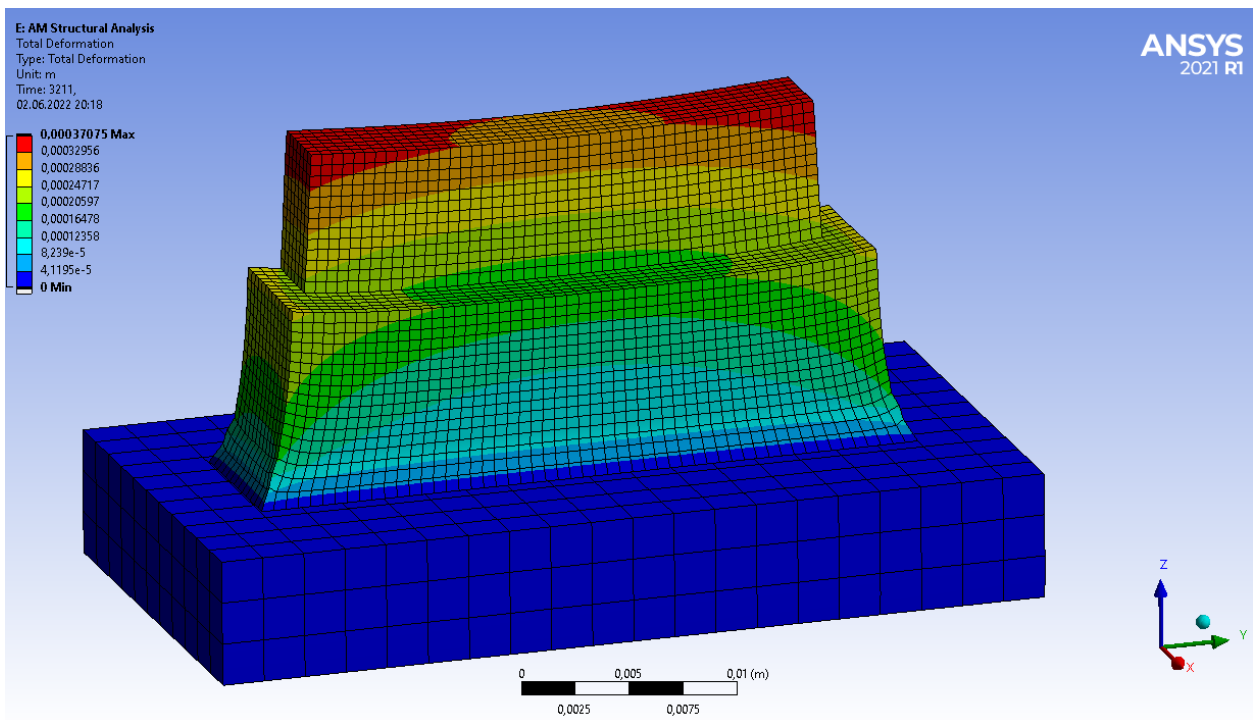


Рис.22. Остаточные деформации в детали

4.2. Вертикальная ориентация.

Аналогично для вертикальной ориентации:

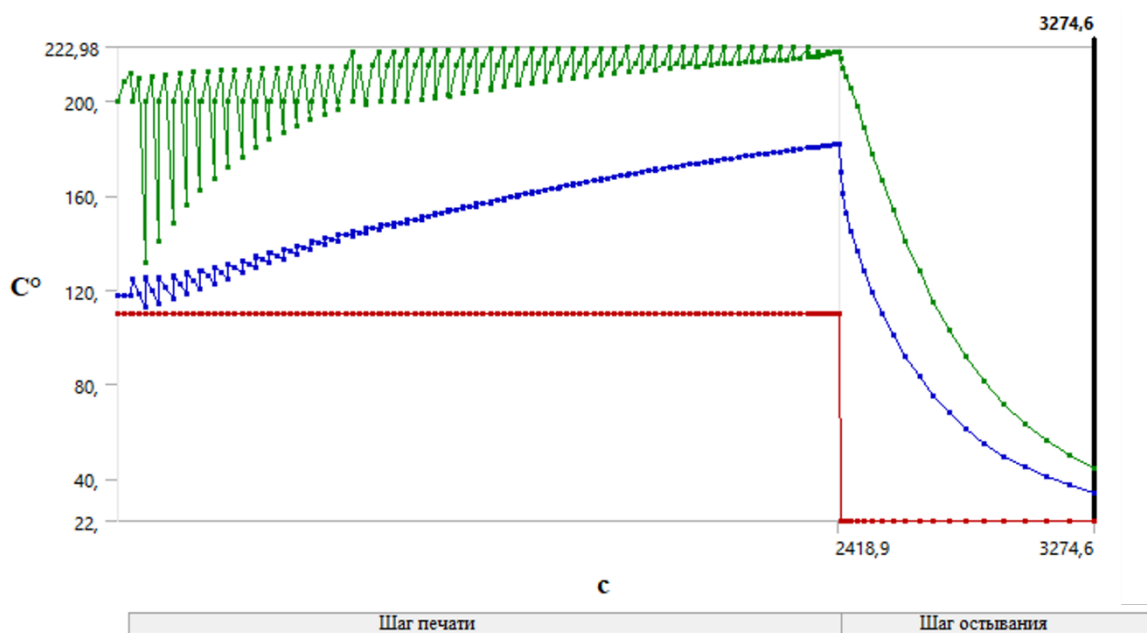


Рис.23. Зависимость максимальной средней и минимальной температур от времени при горизонтальной ориентации детали в камере печати.

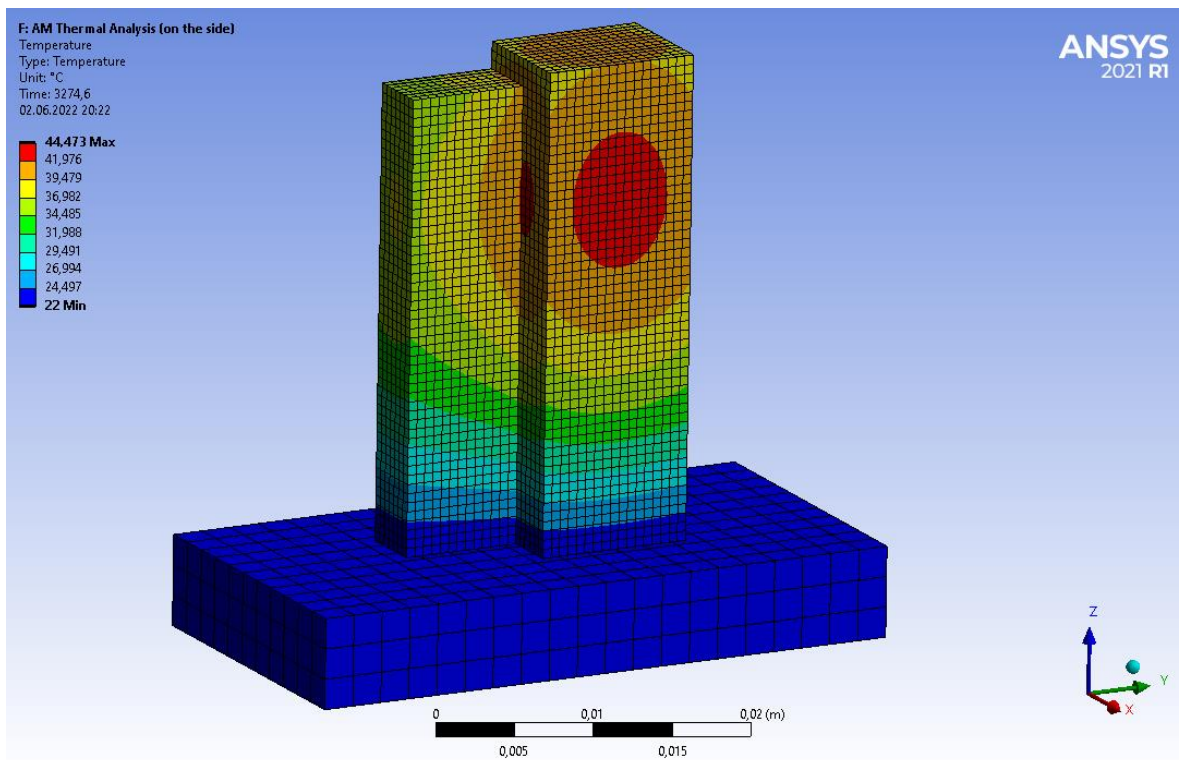


Рис.24. Распределение температуры в детали.

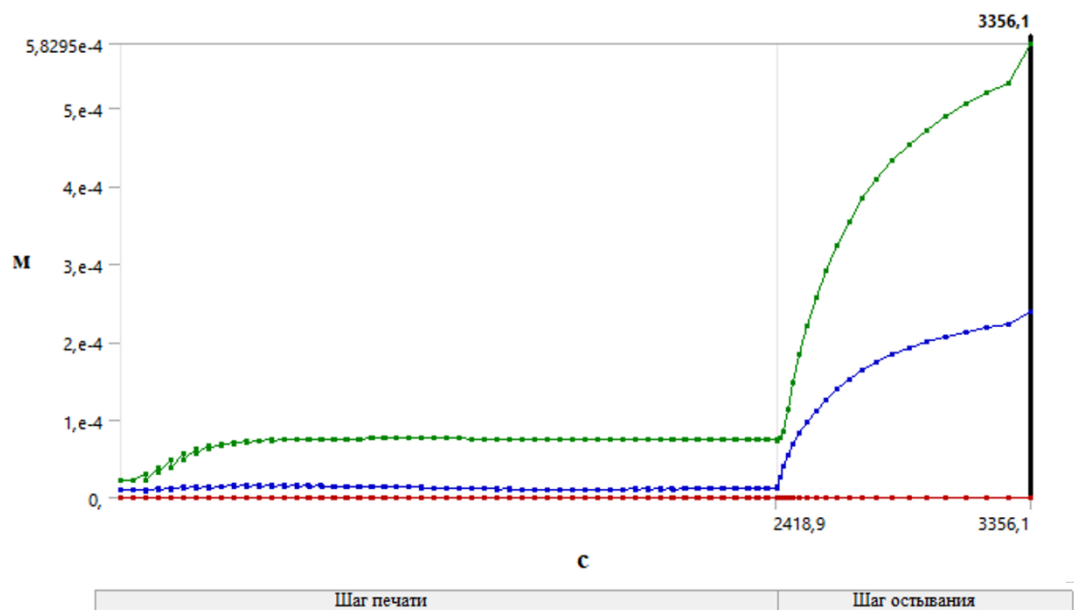


Рис.25. Зависимость максимальной, средней и минимальной деформаций от времени по окончанию расчёта

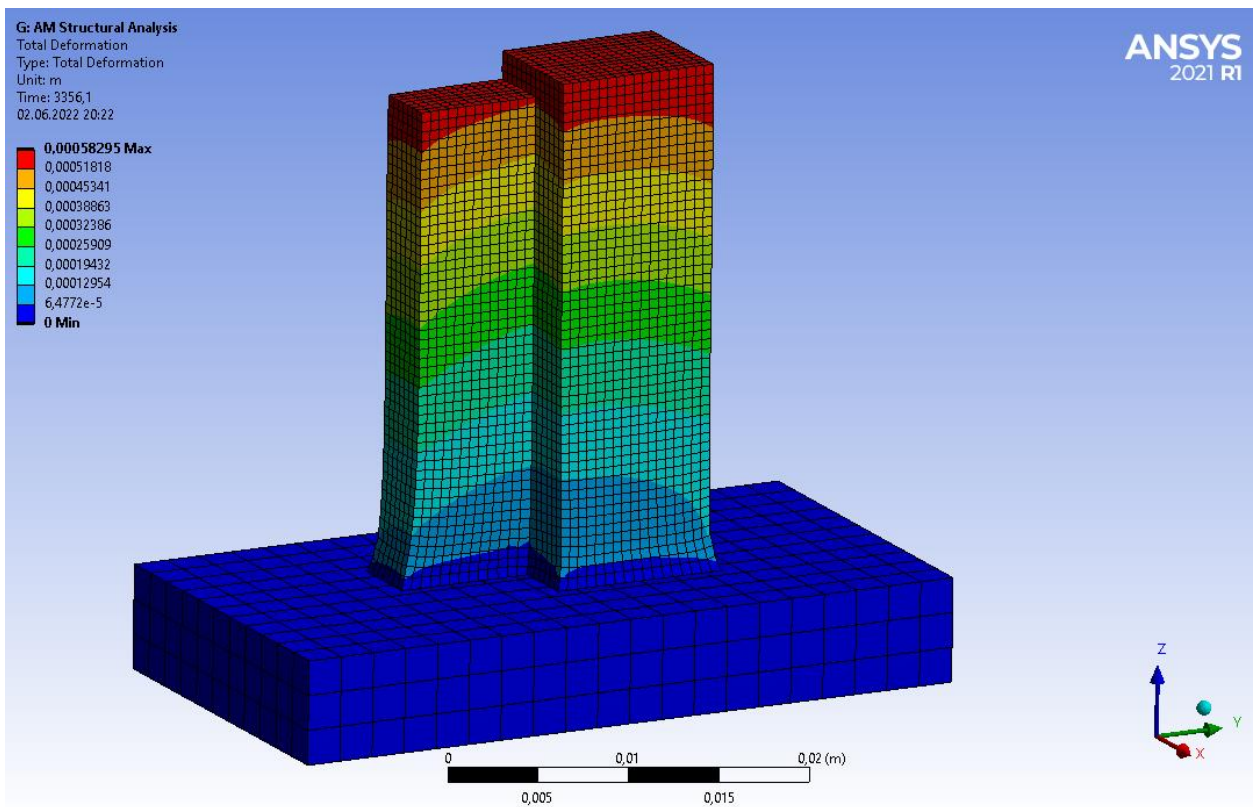


Рис.26. Остаточные деформации в детали

4.3. Ориентация под наклоном.

Для ориентации детали под наклоном в 15° вокруг оси у:

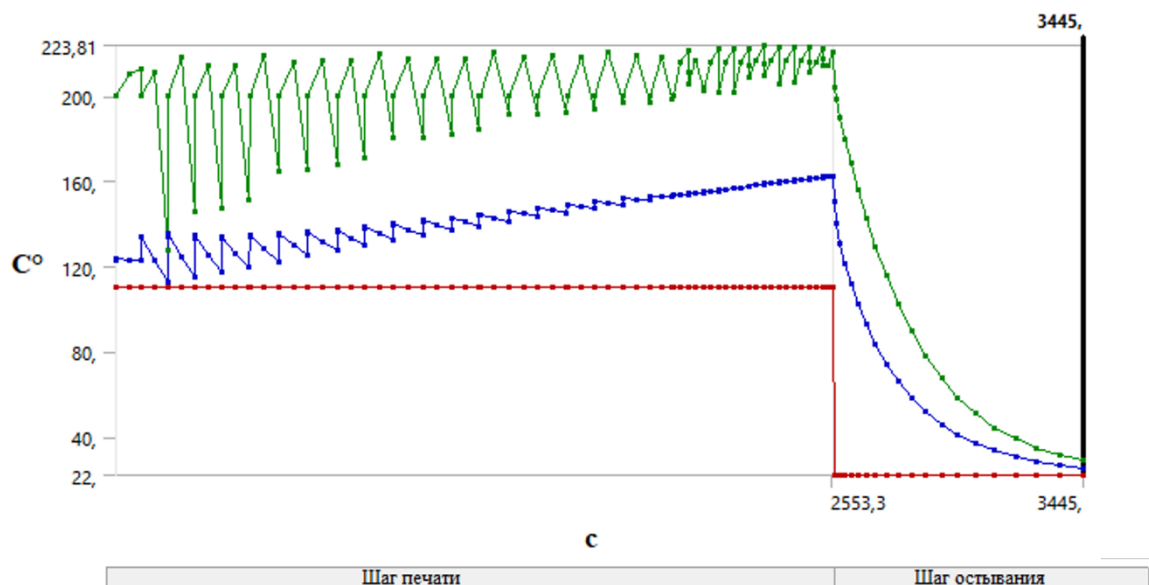


Рис.27. Зависимость максимальной средней и минимальной температур от времени при горизонтальной ориентации детали в камере печати.

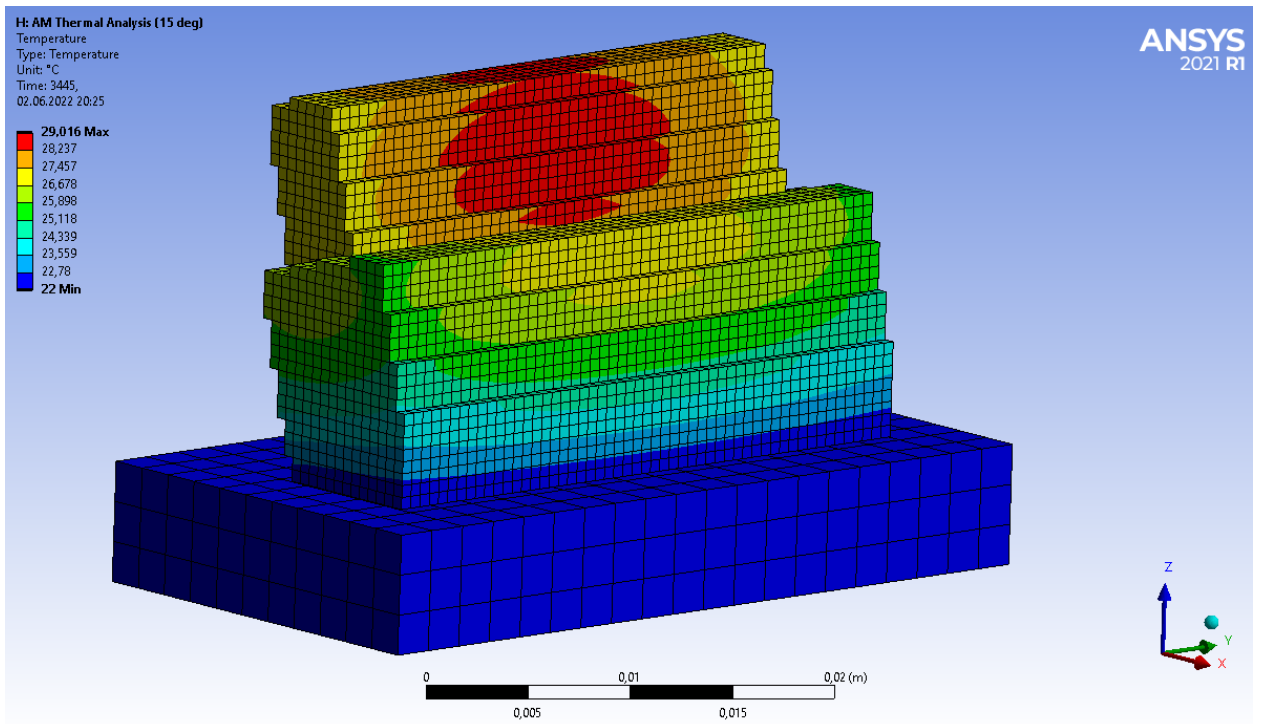


Рис.28. Распределение температуры в детали.

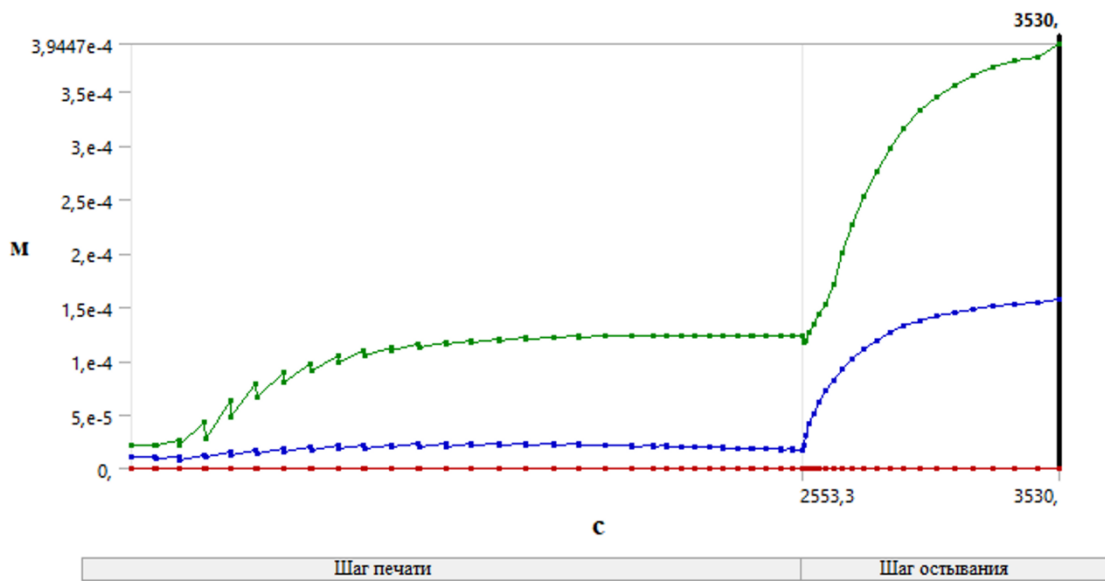


Рис.29. Зависимость максимальной, средней и минимальной деформаций от времени по окончанию расчёта

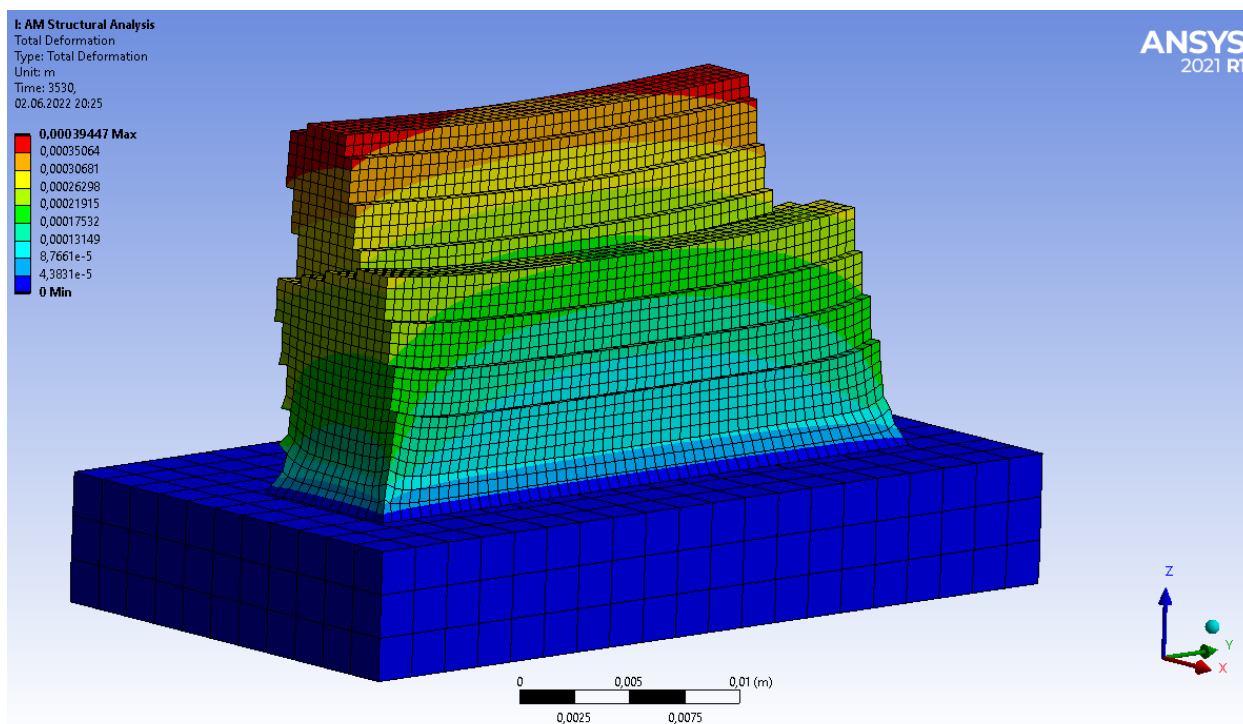


Рис.30. Остаточные деформации в детали

Итак, как можно заметить, самое долгое остывание и самые большие деформации наблюдаются у вертикальной ориентации, что можно объяснить тем, что на печать одного слоя у других ориентаций уходит больше времени и, следовательно, приложение тепла к точке с теми же координатами x , y у вертикальной ориентации происходит чаще, что не даёт элементам модели времени остыть.

По полученным графикам зависимостей деформаций от времени мы видим, что в моменты большой градиенты температуры (в начале шага печати и после отключения источников тепла) наблюдаются самые большие увеличения остаточных деформаций в детали. А зигзагообразный график зависимости температуры от времени отражает послойную печать с небольшими остываниями на каждом слое.

Деталь, расположенная в камере печати под наклоном, требует для своего создания также печать поддержек. Поэтому время, необходимое для печати детали под наклоном больше на 372с, чем время печати детали,

ориентированной горизонтально. Следовательно, деталь под наклоном дольше испытывает градиенту температуры, а значит имеет чуть большие остаточные деформации.

Одно из основных отличий при использовании в качестве материала для печати не пластика и металла состоит в том, что для того, чтобы производить печать металлами и уменьшать пористость структуры необходимо нагревать металлический порошок до температуры плавления более мощными источниками тепла, чем для пластика, такими, как лазер. Для работы с металлом важными становятся параметры высоты слоя печати и размера лазерного пятна. Также необходимо учитывать температуру газов в камере печати, которые используются для предотвращения окисления металлического порошка. Чтобы обеспечить хорошую текучесть и плотность готового изделия, металлические частицы должны иметь сферическую форму и иметь размер всего лишь в несколько мкм.

Заключение

Таким образом, было рассмотрено моделирование процесса печати с послойной генерацией сетки в Ansys, в результате проделанной работы было подтверждено, что изменение температуры вызывает тепловые деформации в материале, а ограничение теплового расширения приводит к появлению напряжений.

Была проведена симуляция этапов аддитивного производства на тестовой геометрии. Также было проведено моделирование процесса послойной печати для детали из ABS пластика. Получены поля распределения температур, остаточных напряжений и деформаций при различных ориентациях детали в камере печати. Было получено, что при вертикальной ориентации детали, остаточные деформации выходят наибольшими. Это значит, что увеличение количества слоёв и уменьшение площади слоя приводят к увеличению остаточных деформаций.

Необходимо провести работу по сравнению численных экспериментов с реальными экспериментами для подтверждения достоверности результатов расчёта модели, описывающей послойную печать в пакете Ansys Workbench Mechanical Additive Process Simulation.

Список использованной литературы

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. — М.: Машгиз – 1963. — 239 с.
2. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А., *Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции.* — М.: Издательство Юрайт – 2018. — 247 с.
3. Чернышев Г.Н., *Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах.* М.: Наука – 1996. — 240 с.
4. Barnett E., Gosselin C., *Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot* – CNRS-LIRMM – 2015.
5. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G., *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review* – *Int Manuf Technol* – 2016.
6. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., *Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties* - *Prog. Mater. Sci.* – 2018.
7. Gatsos T., Elsayed Karim A., Zhai Yuwei, *Review on Computational Modeling of Process–Microstructure–Property Relationships in Metal Additive Manufacturing* – 2020.
8. Ghosh S., Choi J., *Three-dimensional transient finite element analysis for residual stresses in the laser aided direct metal/material deposition process,* *J. Laser Appl* – 2005.
9. Gockel J., Beuth J., Taminger K., *Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V.* *Addit Manuf* 1-4 – 2014. – C.119-126.
10. Jacobs P.F., *Fundamentals of stereolithography.* *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* – 1992. – C.196-211.
11. Jee H.J., Sachs E., *A visual simulation technique for 3D printing.* *Adv Eng Softw* 31– 2000. – C.97-106.
12. Martínez J., Diéguez J.L., Ares E., Pereira A., Hernández P., Pérez J.A., *Comparative between FEM models for FDM parts and their approach to a real mechanical behaviour.* *Procedia Eng* 63 – 2013. – C.878–884.

13. Mughal M.P., Fawad H., Deformation modelling in layered manufacturing of metallic parts using gas metal arc welding: effect of process parameters – IOP Publishing Ltd – 2005.
14. Nickel A.H., Barnett D.M., Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing – Stanford – 2001.
15. Paquet E., Le Loch S., Furet B., Numerical Simulation and Experimentation of Additive Manufacturing Processes with Polyurethane Foams – LNME – 2021.
16. Song Xu, Feih S., Zhai Wei, Advances in additive manufacturing process simulation: Residual stresses and distortion predictions in complex metallic components – Elsevier Ltd. – 2020. – C.11-16.
17. Wang X.C., Kruth J.P. A simulation model for direct selective laser sintering of metal powders. – Computational Techniques for Int J Adv Manuf Technol Materials, Composites and Composite Structures, Civil-Comp, Edinburgh – 2000 – C.57–71.
18. Wu A.S., Brown D.W., Kumar M., An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel – Metallurgical and Materials Transactions – 2014.
19. Yardimci M.A., Hattori T., Gucerli S.I., Danforth S.C., Thermal analysis of fused deposition. – In: Solid freeform fabrication proceedings. University of Texas at Austin, Austin – 1997.