

О возможных подходах к визуализации процесса селективного лазерного сплавления

А.А. Молотков^{1,А,В}, О.Н. Третьякова^{2,А,В}

^А ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ

^В ООО «ПРОМИС ЛАБ» группы компаний «Лазеры и Аппаратура»

¹ ORCID: 0000-0002-9335-5219, karacerr@gmail.com

² ORCID: 0000-0003-0256-4558, tretiyakova_olga@mail.ru

Аннотация

В данной работе рассматривается вопрос о визуализации ранее смоделированного авторами процесса селективного лазерного сплавления в целях упрощения анализа полученных результатов и подбора технологических параметров работы установки аддитивного производства. В статье представлены два возможных подхода к визуализации процесса селективного лазерного сплавления для реализации функций, упрощающих работу по проведению исследований новой технологии. В двумерном режиме визуализации делается упор на возможности более детального исследования процесса. В трехмерном – на возможности обзора картины в целом.

Ключевые слова: 3D модель, визуализация, математическая модель, селективное лазерное сплавление.

1. Введение

На сегодняшний день, развитие методов порошковой металлургии и лазерной оптики позволяет не только проводить высокоточные исследования [1], но и разрабатывать новые методы производства. Технология послойного селективного лазерного сплавления SLM (selective laser melting), – новая технология аддитивного производства, позволяющая получать изделия сложной формы, которые невозможно создавать при помощи классических методов производства. Она наиболее востребована в аэрокосмической [2] отрасли, например, при создании деталей из различных видов сталей, алюминиевых и титановых сплавов [3], и биомедицинской отрасли [4]. Стоит отметить, что данная технология реализована на российском оборудовании, например, в установке МЛ6-1, производимого группой компаний «Лазеры и аппаратура», рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальная установка МЛ-6-1.



Рис. 2. Деталь, изготовленная на установке МЛ-6-1.

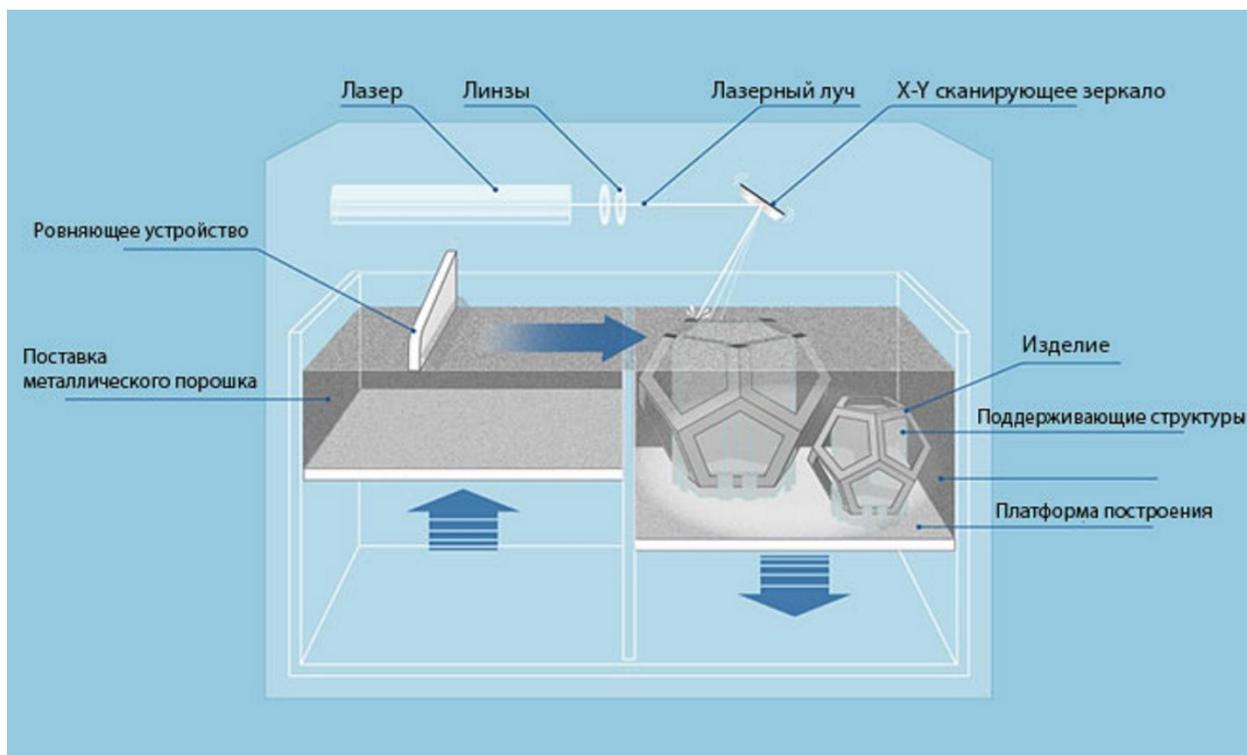


Рис. 3. Принципиальная схема SLM процесса. [9]

Узость технологического окна параметров, вызванная как сложностью геометрии изготавливаемых деталей, рис. 2, так и сложностью самого процесса изготовления, рис. 3, приводит к необходимости проведения численного моделирования [5-7]. В первом приближении задача моделирования процесса SLM сводится к решению краевой задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов первого рода (плавления и отвердевания).

В работе [8] подробнее описано проведенное нами численное моделирование теплообмена в процессе SLM и сравнение с расчетами других авторов. На основе полученных результатов создан программный комплекс, включающий: 1. расчет теплообмена в SLM процессе, 2. визуализацию результатов моделирования температурного поля.

Важной частью программного комплекса являются визуальные компоненты, отвечающие за отображение полученных результатов. В программе предусмотрено два режима визуализации: двумерный и трёхмерный.

2. Математическая модель

В первом приближении для моделирования SLM процесса создана математическая модель процесса нагрева металлического объекта подвижным источником тепла. Источник тепла представляет собой унимодальный гауссов пучок лазерного излучения. Часть падающего излучения отражается. Нагреваемый материал в ходе расчётов претерпевает процессы плавления и отвердевания.

Для задания гауссова пучка поверхность нагреваемого тела разбивалась на несколько областей. На каждой области задавалось граничное условие второго рода, где входящий поток тепла рассчитывался через интенсивность излучения, падающего на данную область в определённый момент времени. Таким образом, проводится аппроксимация гауссовой функции поперечного пространственного распределения плотности мощности лазерного излучения кусочно-линейной функцией. Из соотношений (1-2)

$$I = I_0 e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}} \quad (1)$$

$$P_0 = 2\pi \int_0^\infty I(r)rdr = \frac{\pi}{2} \omega^2 I_0 \quad (2)$$

Получаем

$$I(r) = \frac{2P_0}{\pi\omega^2} e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}} \quad (3)$$

где ω - характерный радиус пучка (расстояние от центра пучка, на котором интенсивность уменьшается в e^2 раз), I_0 - максимум интенсивности излучения, P_0 - мощность лазера, I - интенсивность излучения, r - расстояние до центра пятна. Таким образом, приходим к зависимости интенсивности в конкретной точке пространства.

При решении необходимо было учитывать существенное влияние отражения части излучения от поверхности металла. удалено Формула для интенсивности излучения, которая используется нами в дальнейших расчётах, выглядит следующим образом

$$I(r) = (1 - R) \frac{2P_0}{\pi\omega^2} e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}} \quad (4)$$

где R – коэффициент отражения поверхности металла.

В основе математической модели, как уже указывалось, лежит уравнение теплопроводности, которое описывает распределение температуры в заданной области пространства и ее изменение во времени.

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (5)$$

где ρ - плотность, $C(T)$ - функция зависимости теплоёмкости от температуры, K - коэффициент теплопроводности, T - температура, x, y, z - пространственные переменные, t - время, q - объёмная плотность тепловых источников в момент времени t в точке x .

С начальными условиями:

$$T(x, y, z, 0) = 300^0 C,$$

и смешанными граничными условиями:

$$\begin{cases} T(0, y, z, t) = 300^0 C \\ T(l_x, y, z, t) = 300^0 C \\ T(x, 0, z, t) = 300^0 C \\ T(x, l_y, z, t) = 300^0 C \\ q(x, y, 0, t) = Q(x, y, z, t) \\ T(x, y, l_z, t) = 300^0 C \end{cases}$$

Тепловой поток на границе вычисляется с использованием формулы (4).

Данная дифференциальная краевая задача при помощи формул численного дифференцирования

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{T_{i,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^n}{\Delta t} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{K}{h_x^2} (T_{i+1,j,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i-1,j,m}^n) \\ \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &= \frac{K}{h_y^2} (T_{i,j+1,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i,j-1,m}^n) \\ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{K}{h_z^2} (T_{i,j,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i,j,m-1}^n) \end{aligned}$$

преобразуется в конечно-разностную краевую задачу вида

$$\begin{aligned} \rho C \frac{T_{i,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^n}{\Delta t} &= \frac{K}{h_x^2} (T_{i+1,j,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i-1,j,m}^n) + \\ &+ \frac{K}{h_y^2} (T_{i,j+1,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i,j-1,m}^n) + \frac{K}{h_z^2} (T_{i,j,m+1}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i,j,m-1}^n) + Q \end{aligned} \quad (6)$$

Модель фазовых переходов изменена по сравнению с работой [10] при помощи замены:

$$\frac{H_{i,j,m}^{n+1} - H_{i,j,m}^n}{\Delta t} = \rho C \frac{T_{i,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^n}{\Delta t}$$

Таким образом имеем

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,m}^{n+1} - H_{i,j,m}^n}{\Delta t} &= \frac{K}{h_x^2} (T_{i+1,j,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i-1,j,m}^n) + \\ &+ \frac{K}{h_y^2} (T_{i,j+1,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i,j-1,m}^n) + \frac{K}{h_z^2} (T_{i,j,m+1}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i,j,m-1}^n) + q \end{aligned}$$

где H – энтальпия, K – коэффициент теплопроводности, h – пространственный шаг, T – температура, Δt – временной шаг, i, j, m – индексы пространственных координат, n – индекс времени.

И зависимость температуры от энтальпии (H) имеет вид [10].

$$T = \begin{cases} H/C_s, & H \leq C_s T_m \\ T_m, & C_s T_m < H < C_s T_m + H_m \\ T_m + \frac{H - C_s T_m - H_m}{C_l}, & C_s T_m + H_m \leq H \end{cases},$$

где T_m - температура плавления, C_s - теплоёмкость до фазового перехода, C_l - теплоёмкость после фазового перехода. Данная явная конечно-разностная схема (6) имеет первый порядок точности по времени и второй по пространству.

Теплоёмкость материала изменяется в зависимости от температуры, эта зависимость учитывается путём изменения модели перерасчёта температуры через энтальпию. Способ перерасчёта температуры при помощи энтальпии несколько модифицирован нами, по сравнению с работой [10].

Если имеем данные о зависимости объёмной теплоёмкости материала от температуры $C_1 - T_1, C_2 - T_2, \dots, C_n - T_n$, то, определяя рекурсивно значение энтальпии, соответствующее указанным температурам

$$\begin{aligned} H_1 &= C_1 * T_1 \\ H_2 &= H_1 + C_2 * T_2 \\ &\dots \\ H_{n-1} &= H_{n-2} + C_{n-1} * T_{n-1} \\ H_n &= H_{n-1} + C_n * T_n \end{aligned}$$

и предварительно рассчитав эти значения, приходим к новой модели перерасчёта температуры от энтальпии

$$T = \begin{cases} H/C_1, & H \leq H_1 \\ T_1 + \frac{H - H_1}{(C_2 - C_1)/2}, & H_1 < H < H_2 \\ T_2 + \frac{H - H_2}{(C_2 - C_1)/2}, & H_2 < H < H_3 \\ \dots \\ T_{n-2} + \frac{H - H_{n-2}}{(C_{n-1} - C_{n-2})/2}, & H_{n-2} < H < H_{n-1} \\ T_{n-1} + \frac{H - H_{n-1}}{(C_n - C_{n-1})/2}, & H_{n-1} < H < H_n \\ T_m, & H_n < H < H_n + H_m \\ T_m + \frac{H - C_s T_m - H_m}{C_l}, & H_n + H_m \leq H \end{cases}$$

3. Программная реализация

Для моделирования теплообмена в SLM процессе были созданы программы SLMT1 для расчёта распределения температур в области ванны расплава и SLMT2 для нахождения поля температур во всей детали.

Программа SLMT1 послужила основой для модуля теплофизической симуляции (в дальнейшем SimulationLib) для программного комплекса LaserAprBuildProcessor - части программного обеспечения станка лазерной 3D печати по технологии селективного лазерного сплавления МЛ6-1, Производимого группой компаний «Лазеры и аппаратура».

LaserAprBuildProcessor- программный комплекс, задачей которого являются: 1) оказание всесторонней помощи инженеру-технологу и оператору станка, 2) разделение модели детали на слои, являющиеся вводными данными для работы станка, 3) заполнение слоёв множеством отрезков-траекторий лазера, 4) построение поддержек, 5) генерация режимов работы лазера

SimulationLib(SLMT2)- модуль теплофизической симуляции, сопутствующая программа, упрощающая инженеру-технологу выполнение его служебных обязанностей.

В отличие от SLMT1, SimulationLib выполняет расчёт температурного распределения во всей детали, а не в области ванны расплава. В новой программе SLMT2 стало возможно учитывать траекторию лазерного луча, геометрию детали, насыпания новых слоёв, была учтена зависимость теплофизических параметров материала от температуры.

Траектории луча представляют собой отрезки, задаваемые двумя точками (точка начала и точка конца отрезка). SimulationLib получает их, вместе с геометрией детали из внешней среды LaserAprBuildProcessor.

4. Общая информация о программном коде

Программный код написан на языке C# с применением технологий платформы .NET (WPF). Установочная программа создана при помощи системы NSIS (Nullsoft Scriptable Install System). Программа предназначена для работы на ОС Microsoft Windows и требует наличия платформы .NET Framework 4.7. Для визуализации активно используются возможности открытой библиотеки SharpGL для C#, позволяющей без труда пользоваться возможностями OpenGL. Применение архитектурного паттерна разработки MVVM (Model-View-ViewModel) позволило отделить логику приложения от визуальной части (представления) и достичь более четкой и осмысленной структуры. В роли входных данных выступают файлы формата CLI (Common Layer Interface) – универсальный формат для ввода геометрических данных в системы изготовления моделей, основанные на технологиях изготовления слоев (LMT). Он подходит для систем, использующих послойное фотоотверждение смолы, спекание или связывание порошка, резку листового материала, затвердевание расплавленного материала, и любых других систем, которые создают модели послойно. Данный формат активно используется в отрасли аддитивного производства. Данные такого формата получаются в результате работы различных программ для подготовки и редактирования данных формата STL (от англ. stereolithography) для аддитивного производства. Ярким примером такой программы является Materialize Magics.

5. Двумерная визуализация

В режиме 2-D послойно отображается деталь, проекции поддержек, необходимых для компенсации образующихся в ходе процесса термических напряжений и предотвращения деформаций. При необходимости программа выполняет следующие функции:

1. Создает одну или несколько эквидистант, очерчивающих контур детали, что позволяет осуществлять обход детали по контуру лазером в различных режимах. Это позволяет добиваться в последствии более высокого качества поверхности.
2. Разбивает внутреннее пространство на области варьируемой площади и проводит их заштриховку. Каждая получившаяся штрих-линия является траекторией лазера. Процедура такой «заштриховки» является этапом подготовки технического задания станка.

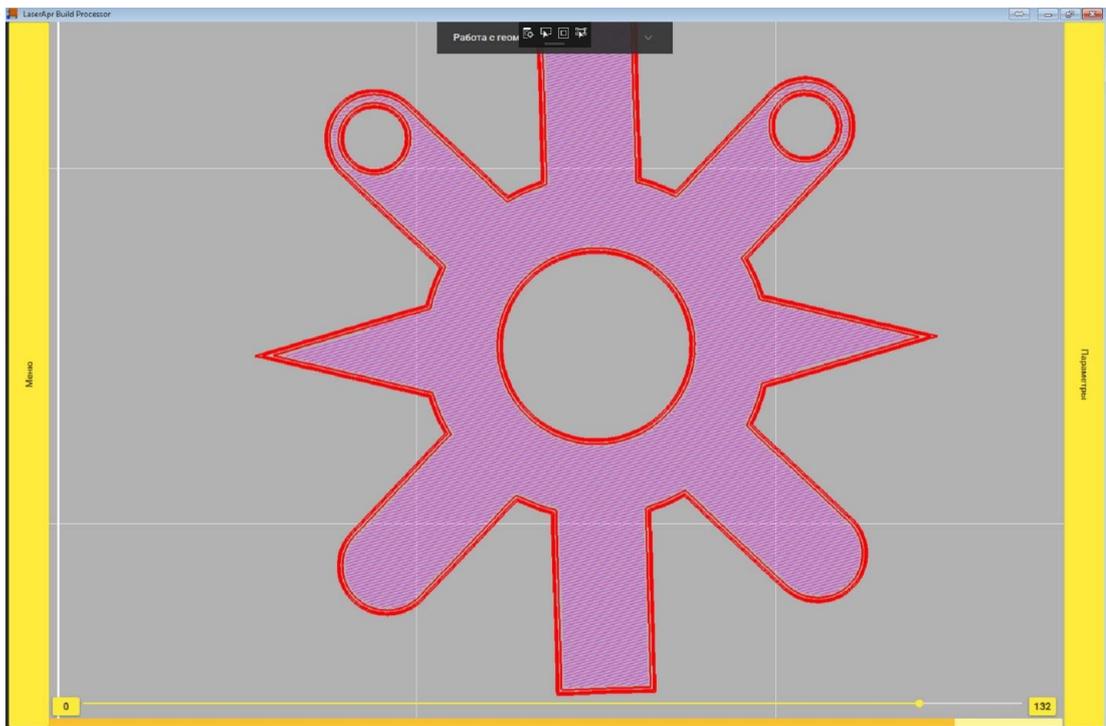


Рис. 4. Контур детали.

В последствии, на каждый слой, рис. 4, после проведения моделирования, накладывается поле температур, рис. 5, рис. 6. При расчёте учитывается траектория движения лазера, его мощность, скорость, форма распределения излучения, теплофизические параметры материала, насыпание порошка. Информация о каждом шаге численного расчёта сохраняется в буфер, что позволяет определить значение температуры в любое время предстоящего процесса сплавления для каждого слоя. Для упрощения анализа полученных результатов предусмотрена функция создания пользовательских палитр, при помощи которой технолог может сам определять количество цветовых интервалов, их длину, цвет, а также какой вариант заливки (градиентный или сплошной) для каждого интервала использовать. Реализована возможность динамического изменения отслеживаемого интервала при помощи двухпалочного слайдера, что позволяет сконцентрироваться на определённой, интересующей технолога области. Поскольку даже в слоях с высокой кучностью расположенных объектов и густой их заштриховкой количество отображаемых элементов относительно невысоко, проблем с производительностью даже на слабых системах не возникает. Напротив, такая проблема остро встаёт при трёхмерном отображении.

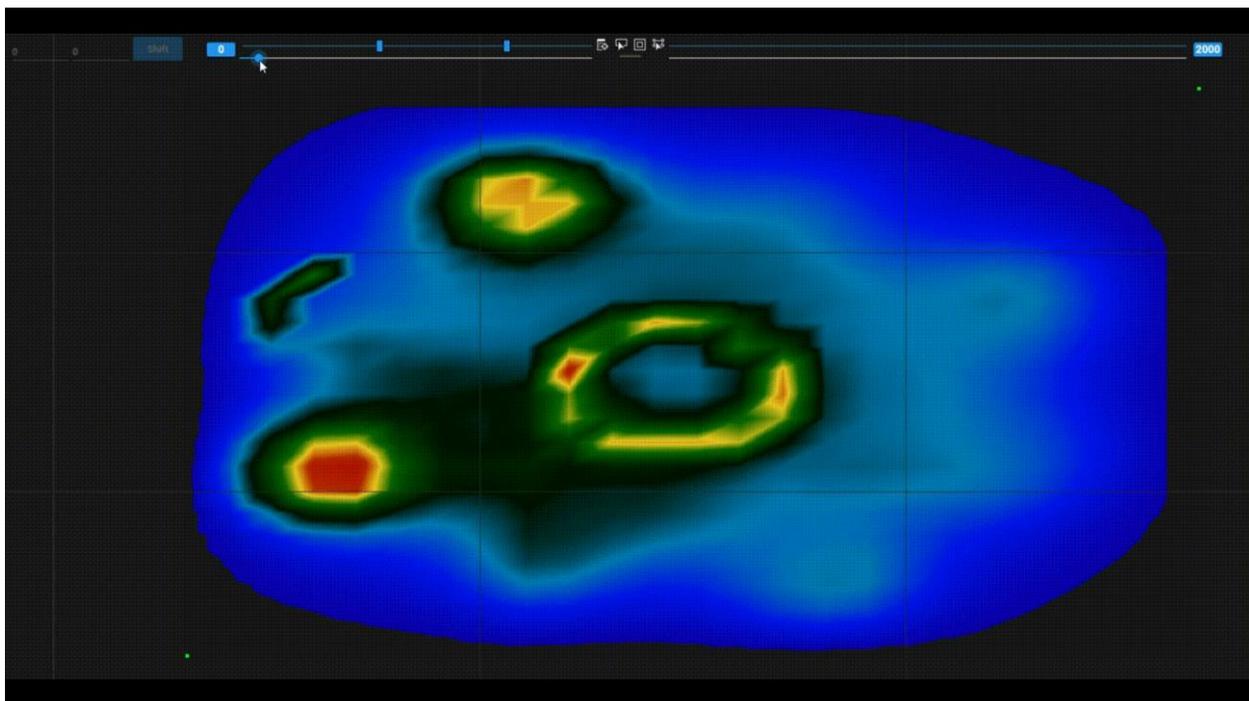


Рис. 5. Визуализация нагрева детали в процессе изготовления в момент времени.

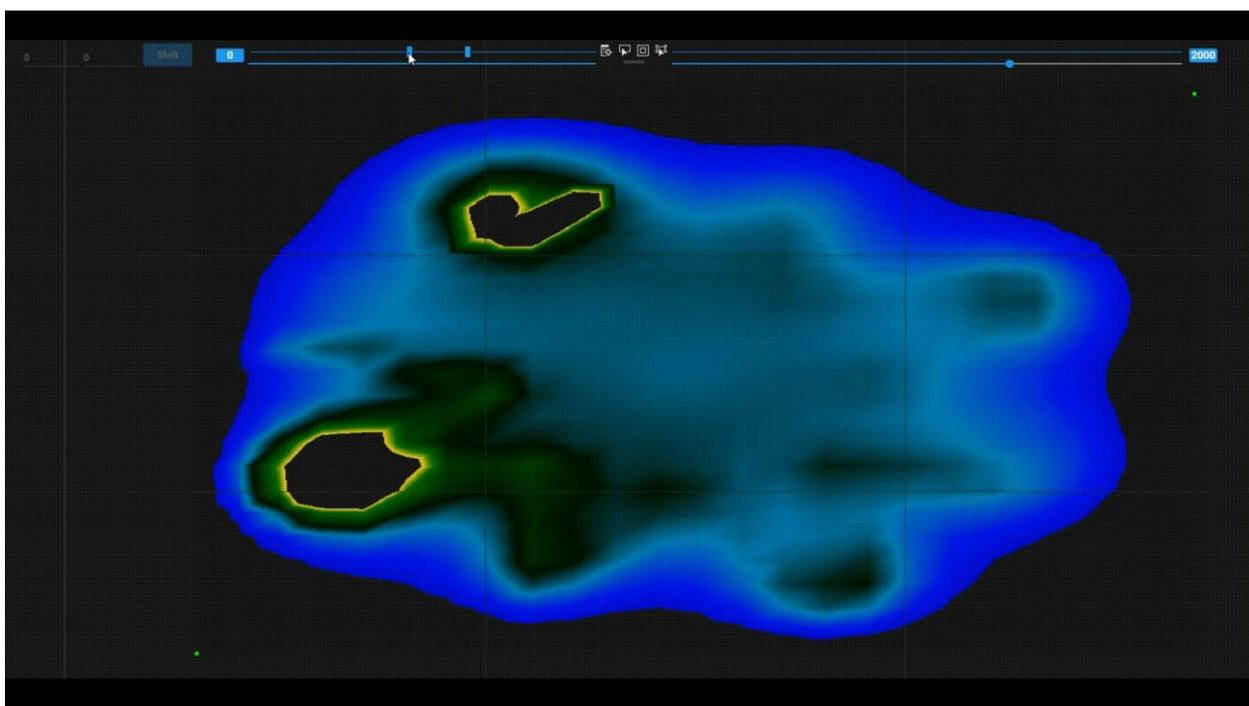


Рис. 6. Выделение критической зоны наибольшего нагрева показано красным цветом.

6. Трёхмерная визуализация

В 3-D режиме отображаются все слои вместе, что позволяет увидеть деталь в исходном виде, рис. 7. Сохраняется возможность просмотра температур,

рис. 8, рис. 9, но, в отличие от 2-D режима, поле температур можно просматривать в трёх проекциях. Отображаемые в этом режиме цвета накладываются на три перпендикулярные секущие плоскости. При движении каждой из этих плоскостей из отображения убираются мешающие просмотру части детали. Таким образом в 3-D режиме оператор имеет возможность видеть температуры не только на плоскости XOY , но и в плоскостях YOZ и XOZ . Поскольку для больших деталей количество отображаемых графических примитивов, построенных на основе карты слоёв, превышает в некоторых случаях полмиллиона, перед отрисовкой проводится упрощение отображаемой геометрии, таким образом, чтобы для оператора разница была слабо заметна. Упрощение реализовано по трём принципам:

1. Нарезание трёхмерной модели изготавливаемой детали происходит в программах подготовки данных, о чем указывалось ранее. Поскольку геометрия слоя определяется путём поиска пересечения составляющих модель объекта треугольных примитивов, в результирующем файле очень часто даже прямые линии представляют собой не один, а несколько объектов. Такие отрезки, без риска потери точности можно вновь объединить в один, там самым уменьшив количество отображаемых в последствии примитивов. Вычислительная сложность такого упрощения, составляет $O(N)$, где N – число элементов в слое, и применяется лишь один раз.
2. Поскольку к создаваемым деталям в промышленности предъявляются высокие требования, линии различной степени кривизны аппроксимируются прямыми отрезками малых размеров, позволяющими сохранять высокое качество поверхности. При визуализации же такая точность очень часто является излишней. Поэтому для отображения используется не оригинальная карта слоёв, а её упрощённый вариант. Если для двух отрезков начало одного отрезка совпадает с концом второго, и один отрезок лежит под небольшим углом к другому (если данный угол меньше заданной величины, зависящей от расстояния между точкой обзора и рассматриваемыми отрезками), то такие отрезки можно заменить одним в упрощённой версии карты слоёв. Поскольку в слое отрезки лежат по порядку и необходимо сравнивать только соседние, вычислительная сложность так же составляет $O(N)$, где N – число элементов в слое.
3. Чаще всего два любых соседних слоя отличаются не сильно, это позволяет, при небольшом приближении исключать целые слои из упрощённой карты. Слои считаются непохожими, если в одном слое существуют отрезки, находящиеся на большом расстоянии от всех отрезков другого слоя. Вычислительная сложность сравнения слоёв, для определения «похожести», составляет $O(N * M)$, где N и M – число элементов в двух сравниваемых слоях. Стоит отметить, что в соответствие к каждому слою ставится специальная числовая пометка, равная величине приближения, после которой различия в слоях незаметны и данный слой потенциально не должен отрисовываться, – это позволяет дополнительно уменьшить число побочных вычислений.

Второй и третий способы упрощения применяются при изменении масштаба отображения. Таким образом, при уменьшении масштаба количество отображаемых примитивов в большинстве случаев уменьшается, что снижает нагрузку на систему и ускоряет работу программы, а при увеличении масштаба детализация отображаемой детали увеличивается, что позволяет не допускать потерь в информативности. В результате получается повысить кадровую частоту для больших и сложных деталей в среднем с 7 до 15 FPS (кадров в секунду). Несмотря на то, что и 15 FPS – это довольно малое число, этого оказывается вполне достаточно, в связи с тем, что отображаются сугубо стацио-

нарные объекты и движение представлено только в виде вращения и перемещения камеры, перемещения секущих плоскостей, изменения числа отображаемых слоёв.

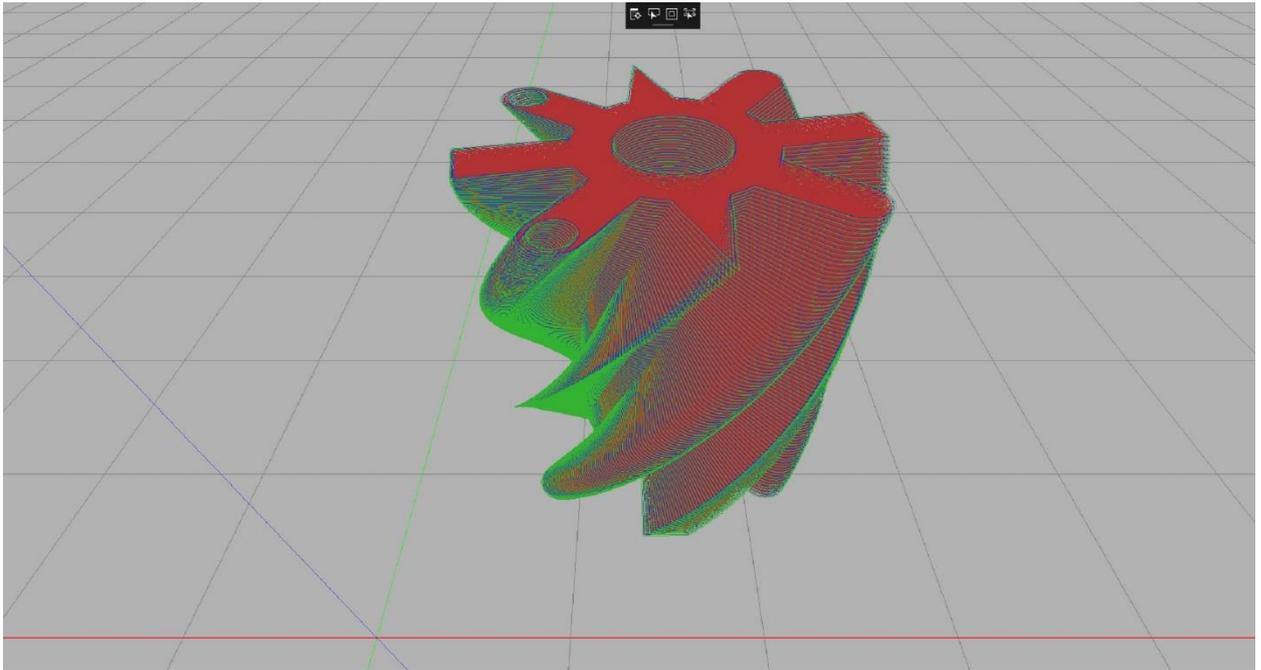


Рис. 7. Трёхмерная модель создаваемой детали.

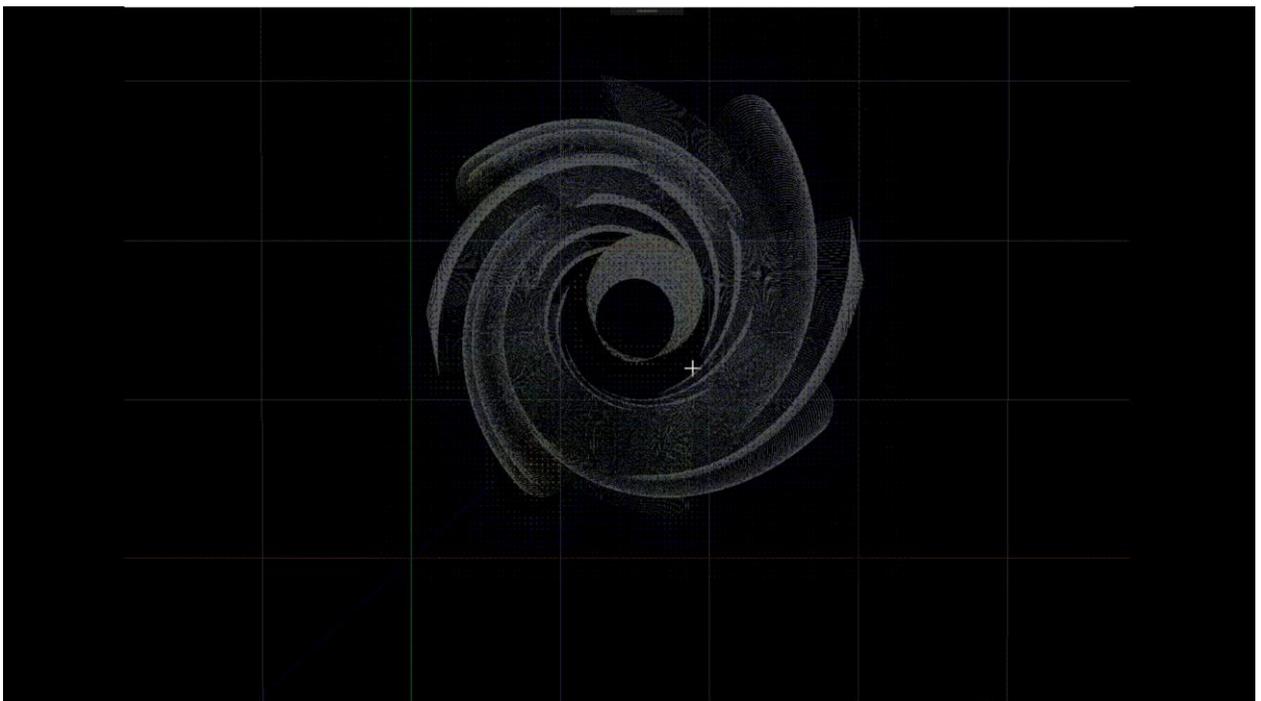


Рис. 8. Модель детали с наложенной поточечной моделью отображения температуры.

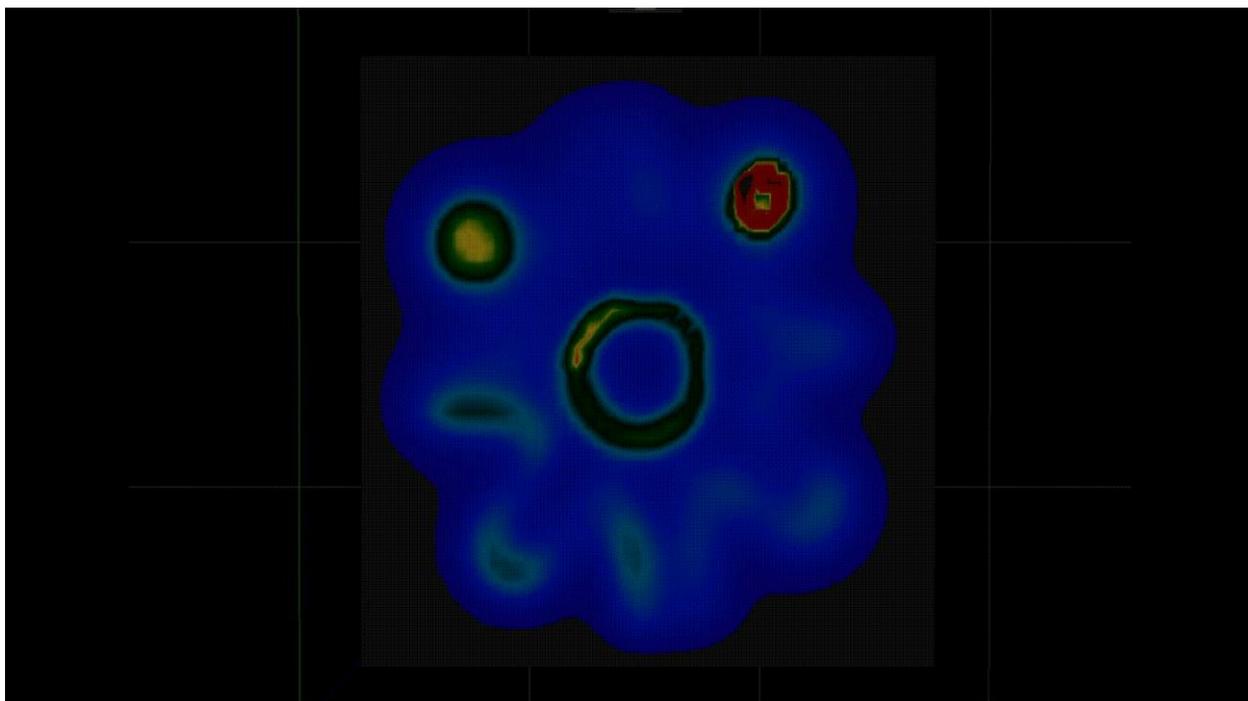


Рис. 9. Модель детали с секущей плоскостью, на которую наложено рассчитанное поле температур. Промежуточные значения температур получены при помощи линейной интерполяции.

7. Преимущества и недостатки

Чаще всего термические расчёты и подобные численные исследования проводят в специальных программах, таких как продукты семейства Ansys и Comsol [11]. Создание собственных моделей SLM процесса в данных системах представляет высокую сложность, задание всей геометрии в ручном режиме требует просто невероятного количества времени, а автоматизация данного процесса требует высокого знания специфичных языков, таких как специально разработанный для использования в Ansys параметрический язык APDL, и высокого уровня навыков программирования. Поэтому в таких системах существуют свои решения данной проблемы, более подробно об отличиях этих моделей от нашей мы писали в работе [8].

Здесь же стоит подробнее остановиться в различиях в визуализации. В решении Ansys для процесса SLM полученные температуры отображаются на поверхности создаваемой детали в виде соответствующего цвета, добраться до значений в глубине детали не так просто, этого можно добиться предварительным разбиением детали на части в графическом редакторе или при помощи APDL, тут мы опять приходим к необходимости знания специального языка. Возникают проблемы с настройкой цветовой палитры, по умолчанию цвета в палитре заданы, а интервал, которому соответствуют цвета, привязан к максимуму и минимуму температуры. За всё время пользования данным продуктом, удобно настроить палитру у нас так и не получилось. В нашей же работе пользователь может легко подобрать цветовую палитру, привязать цвета к определённым температурам или интервалам температур, выделять интересующие области, использовать кусочно-линейный или градиентный вид закрашивания, при помощи секущих видеть температуры в любой точке в любой момент времени. Все эти возможности доступны технологу через пользовательский интерфейс, что существенно снижает требования к уровню подготовки пользователя. Также наша программа включена в ПО для установки российского производства МЛ-6-1. Процесс расчёта и отображения его результатов работает асинхронно, что позволяет в это время продолжать пользоваться

другими функциями программного обеспечения (ПО) станка или проводить исследование на стороннем персональном компьютере (ПК).

Из основных минусов представляемой разработки на данном этапе работы стоит указать, что в основном расчёт проходит однопоточно, что не позволяет полноценно использовать вычислительные возможности многоядерных процессоров. В более профессиональных программах Ansys и Comsol большое внимание уделено внешнему виду работы и визуализации расчёта, текстурированию, работе с освещением, наше же решение визуально смотрится более грубым. Улучшение качества текстур возможно, но это делает программный код более громоздким, а работу в целом более трудоёмкой, что на данном этапе работы мы считаем нецелесообразным.

8. Заключение

В результате созданием двух режимов отображения ранее разработанной модели удалось добиться упрощения процесса исследования и анализа получаемых результатов. Обширная, но пока не всеохватывающая функциональность даёт возможность технологам видеть всю полноту получаемой в ходе моделирования информации о SLM процессе, видеть динамику происходящего, отслеживать интересующие области. Дополнительная возможность использовать два этих режима одновременно (с выводом картинки на один или на несколько экранов) позволяет единовременно видеть картину в целом и концентрироваться на отдельных, локальных зонах.

Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству группы компаний «Лазеры и Аппаратура» за помощь в материально-техническом обеспечении проведения экспериментальных исследований и моделирования рассматриваемого процесса.

Список литературы

- [1] A.V. Vedyashkina, B.S. Rinkevichyus, I.N. Pavlov, I.L. Raskovskaya, A.V. Tolkachev. Optical-electronic complex for investigation of the processes of heat and mass transfer by laser contactless method. Scientific Visualization, 2019, volume 11, number 3, pages 43 - 53, DOI: 10.26583/sv.11.3.04.
- [2] P. Rometsch, Q. Jia, K. Yang, X. Wu. Aluminum alloys for selective laser melting – towards improved performance. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, 2019, Pages 301-325
- [3] M. Mazur, M. Leary, M. McMillan, S. Sun, D. Shidid, M. Brandt. Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM) Laser Additive Manufacturing. Materials, Design, Technologies, and Applications. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2017, Pages 119-161
- [4] K. Vanmeensel, K. Lietaert, B. Vrancken, S. Dadbakhsh, X. Li, J. Kruth, P. Krakhmalev, I. Yadroitsev, J. Humbeeck. Additively manufactured metals for medical applications. Additive Manufacturing, Materials, Processes, Quantifications and Applications, 2018, Pages 261-309
- [5] C. Bruna-Rosso, A. Demir, B. Previtali. Selective laser melting finite element modeling: Validation with high-speed imaging and lack of fusion defects prediction. Materials & Design. Volume 156, 15 October 2018, Pages 143-153
- [6] H. Ali, H. Ghadbeigi, K. Mumtaz. Residual stress development in selective laser-melted Ti6Al4V: a parametric thermal modelling approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. July 2018, Volume 97, Issue 5–8, pp 2621–2633
- [7] E. Mirkoohi, D. Seivers, H. Garmestani, S. Liang. Heat Source Modeling in Selective Laser Melting. Materials 2019, 12, 2052.

- [8] Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н. Математическое моделирование сложного теплообмена при разработке лазерных SLM технологий // Труды МАИ: Электронный журнал, ISSN:1727-6924, №101, 2018.
- [9] SLM (Selective Laser Melting) — технология 3D-печати [Электронный ресурс] // 3d.globatek.ru: [сайт]. URL: http://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/slm-tech/
- [10] Gusarov A.V., Yadroitsev I., Bertrand Ph., Smurov I. Model of Radiation and Heat Transfer in Lazer-Powder Interaction Zone at Selective Lazer Melting // Journal of Heat Transfer, 2009, vol. 131: 072101-1-9.
- [11] К.-Н. Leitz, P. Singer, A. Plankensteiner, B. Tabernig, H. Kestler, L. S. Sigl. Thermo-Fluidodynamical Modelling of Laser Beam-Matter Interaction in Selective Laser Melting. Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Munich. URL: https://www.comsol.co.in/paper/download/359081/leitz_paper.pdf

On possible approaches to visualizing the process of selective laser melting

A.A. Molotkov^{1,A,B}, O.N. Tretiyakova^{2,A,B}

^A Moscow aviation Institute (national research University) MAI

^B LLC “PROMIS LAB” of the group of companies “Lasers and Equipment”

¹ ORCID: 0000-0002-9335-5219, karacerr@gmail.com

² ORCID: 0000-0003-0256-4558, tretiyakova_olga@mail.ru

Abstract

This paper deals with the visualization of the previously simulated by the authors selective laser melting process in order to simplify the analysis of the results and the selection of technological parameters of the additive production unit. The article presents two possible approaches for visualization of the selective laser melting process and supported functions, which simplify the work and research in the framework of the new technology. In the two-dimensional visualization mode, the emphasis is on the possibility of a more detailed study of the process. In a three-dimensional there is the ability of the broader scope and to see the big picture.

Keywords: 3D model, visualization, mathematical model, selective laser.

References

- [12] A.V. Vedyashkina, B.S. Rinkevichyus, I.N. Pavlov, I.L. Raskovskaya, A.V. Tolkachev. Optical-electronic complex for investigation of the processes of heat and mass transfer by laser contactless method. *Scientific Visualization*, 2019, volume 11, number 3, pages 43 - 53, DOI: 10.26583/sv.11.3.04.
- [13] P. Rometsch, Q. Jia, K. Yang, X. Wu. Aluminum alloys for selective laser melting – towards improved performance. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 2019, Pages 301-325
- [14] M. Mazur, M. Leary, M. McMillan, S. Sun, D. Shidid, M. Brandt. Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM) Laser Additive Manufacturing. *Materials, Design, Technologies, and Applications*. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2017, Pages 119-161
- [15] K. Vanmeensel, K. Lietaert, B. Vrancken, S. Dadbakhsh, X. Li, J. Kruth, P. Krakhmalev, I. Yadroitsev, J. Humbeeck. Additively manufactured metals for medical applications. *Additive Manufacturing, Materials, Processes, Quantifications and Applications*, 2018, Pages 261-309
- [16] C. Bruna-Rosso, A. Demir, B. Previtali. Selective laser melting finite element modeling: Validation with high-speed imaging and lack of fusion defects prediction. *Materials & Design*. Volume 156, 15 October 2018, Pages 143-153
- [17] H. Ali, H. Ghadbeigi, K. Mumtaz. Residual stress development in selective laser-melted Ti6Al4V: a parametric thermal modelling approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. July 2018, Volume 97, Issue 5–8, pp 2621–2633
- [18] E. Mirkoohi, D. Seivers, H. Garmestani, S. Liang. Heat Source Modeling in Selective Laser Melting. *Materials* 2019, 12, 2052.

- [19] Lebyodkin I. F., Molotkov A. A., Tretiyakova O. N. Matematicheskoe modelirovanie slozhnogo teploobmena pri razrabotke lazernyh SLM tekhnologij // Trudy MAI: Elektronnyj zhurnal, ISSN:1727-6924, №101, 2018.[In Russian]
- [20] SLM (Selective Laser Melting)-3D printing technology [Electronic resource] // 3d.globatek.ru: [website]. URL: http://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/slm-tech/Gusarov
- [21] A.V., Yadroitsev I., Bertrand Ph., Smurov I. Model of Radiation and Heat Transfer in Lazer-Powder Interaction Zone at Selective Lazer Melting // Journal of Heat Transfer, 2009, vol. 131: 072101-1-9.
- [22] K.-H. Leitz, P. Singer, A. Plankensteiner, B. Tabernig, H. Kestler, L. S. Sigl. Thermo-Fluidodynamical Modelling of Laser Beam-Matter Interaction in Selective Laser Melting. Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Munich. URL: https://www.comsol.co.in/paper/download/359081/leitz_paper.pdf