

*На правах рукописи*



Орехов Александр Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

Специальность: 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и  
аппаратуры

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2021 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** **Рабинский Лев Наумович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Соппротивление материалов, динамика и прочность машин» Московского авиационного института (НИУ)

**Официальные оппоненты:** **Попов Виктор Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского Государственного Технического Университета имени Гагарина Ю.А.

**Волков-Богородский Дмитрий Борисович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт прикладной механики РАН».

**Ведущая организация:** **ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»**

Защита диссертации состоится 15 декабря 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. и на сайте:

[https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=160833](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=160833)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.05

Федотенков Григорий Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность.

Рассматриваемый в настоящей работе метод послойного лазерного плавления металлопорошковой композиции является одним из перспективных способов трехмерной печати металлических изделий. Применение аддитивных технологий позволяет получать изделия с внутренними полостями любой формы (прямоугольные, спиралевидные, сетчатые), например каналы охлаждения для теплообменников, литейные оснастки для создания корпусов новых двигателей, детали с сетчатой структурой.

Методы аддитивного производства (АП) представляют собой альтернативу существующим традиционным методам изготовления деталей. В отличие от субтрактивных методов производства изделий, где от заготовки отсекается все лишнее, методы трехмерной печати «выращивают» деталь из порошковой композиции, частицы которой послойно синтезируются между собой в каждом слое, а слои между собой. Такое принципиальное отличие в производстве приводит к тому, что физико-механические характеристики одного и того же изделия, но изготовленного разными методами, могут существенно отличаться.

Применение источника тепла с высокой энергией к относительно холодной поверхности материала создает большие тепловые градиенты. Эти различия в температуре приводят к тепловому расширению. Кроме того, разница в тепловых градиентах создает исключительные напряжения в детали во время изготовления. Эти напряжения часто превышают предел текучести материала, что приводит к образованию пластических деформаций. В следствие этого, изготовленные методом аддитивного производства детали часто деформируются сверх заданных допусков. Для моделирования процессов АП необходимо уметь предсказывать и путем итерационного моделирования смягчать нежелательные уровни искажений и остаточных напряжений. Остаточные напряжения могут быть уменьшены путем термической обработки после печати. Однако после того, как деталь чрезмерно деформируется, приведение ее в пригодную для использования форму становится невыполнимой задачей. Такие искривления также сопряжены с опасностью растрескивания, что приводит к разрушению материала.

Объектом исследований диссертации являются растущие тела – изделия, полученные методами трехмерной печати по технологии послойного лазерного плавления металлопорошковой композиции.

Предметом и задачей исследования является термонапряженное состояние растущего тела, а также влияние технологических параметров процесса трехмерной печати на физико-механические свойства синтезируемых изделий.

### Методы исследования.

Для решения задачи о термонапряженном состоянии растущего тела были использованы аналитические и численные методы механики деформируемого

твердого тела, теории упругости, теории дифференциальных уравнений. Аналитические методы решения были построены, а их результаты получены с использованием системы компьютерной алгебры в программном пакете Maple. При численном моделировании задачи с использованием метода конечных элементов использовались программные комплексы Ansys и COMSOL Multiphysics. Для определения физико-механических характеристик, были разработаны экспериментальные методы их исследования в испытаниях на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб, а также проведены температурные испытания для определения коэффициентов температурного расширения. Экспериментальные исследования были проведены с использованием универсальной электрической установки Instron 5969 с программным обеспечением Bluehill 3.

**Научная новизна** работы определяется следующими полученными результатами:

- получено аналитическое решение задачи о нестационарном нагреве полупространства подвижным источником лазерного излучения, а также предложен численно-аналитический метод определения технологических температурных напряжений в упругом полупространстве, при воздействии на его поверхность подвижного источника тепла;
- получены новые результаты теплофизических экспериментальных исследований образцов из металлопорошковой композиции AlSi10Mg, синтезированных на установке трехмерной печати методом селективного лазерного плавления металлопорошковой композиции при различных инертных средах и направлениях печати, а также результаты механических испытаний в испытаниях на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб. Определены коэффициенты линейного температурного расширения (КЛТР).
- разработана и реализована в пакете Ansys адекватная конечно-элементная модель послойного селективного лазерного плавления металлопорошковой композиции, позволяющая определять термонапряженное состояние элементов конструкций с учетом анизотропных свойств материала;
- впервые предложен и реализован в конечно-элементном программном комплексе COMSOL Multiphysics метод численного моделирования технологических температурных напряжений, возникающих в монослое в процессе селективного лазерного плавления металлопорошковой композиции AlSi10Mg с учетом реальных параметров трехмерной печати.

**Практическая ценность** работы заключается в создании численно-аналитической модели для решения задачи о нестационарном нагреве полупространства движущимся высокоинтенсивным источником лазерного излучения с учетом технологических параметров установки 3D печати, включающих в себя точную траекторию движения лазерного пятна. Разработана методика проведения численных расчетов для определения напряжений, возникающих в результате воздействия лазерного излучения на

материал в процессе трехмерной печати по технологии селективного лазерного плавления металлопорошковых композиций.

**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, **обосновывается** использованием строгих и апробированных подходов механики деформируемого твердого тела, теории термоупругости, результатами аналитического и численного моделирования, а также результатами экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на конференциях:

- Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред Материалы XXIV международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. 2018, 2019, 2021 гг.
- Международный научный семинар "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы" Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2018.
- Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов», посвященная 65-летию БИИЖТа – БелГУТа. 2018.
- Международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте». 2019, 2020 гг.
- ICCMSE 2021, 17th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering. 2021 г.

#### **Объем и структура диссертации.**

Работа состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 130 страниц основного текста, 54 рисунка, а также списка литературы, состоящего из 119 источников.

#### **Основное содержание работы**

**Во введении** формулируются цели и задачи исследования, научная новизна, актуальность, теоретическая и практическая ценность полученных результатов и их достоверность, приводятся данные о структуре и объеме диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена обзору существующих методов трехмерной печати, используемых установок и материалов, применяемых при изготовлении изделий. Дается общее описание основных методов трехмерной печати и их применение. Приводится обзор работ по численному моделированию физических процессов, протекающих при селективном лазерном плавлении металлопорошковой композиции.

**Во второй главе** представлена методика проведения и результаты экспериментальных исследований образцов из металлопорошковой композиции  $AlSi_{10}Mg$ , изготовленных по технологии селективного лазерного плавления металла при различных параметрах процесса трехмерной печати. В главе представлено описание методики подготовки и изготовления партий

экспериментальных образцов, физико-механические характеристики которых исследуются в данной работе. Экспериментальное определение КЛТР для напечатанных образцов проводилось на универсальной электрической установке Instron 5969 с использованием программного обеспечения Bluehill 3, высокотемпературной печи Instron 3119-406 с диапазоном температур от -100 до +350°C и видеоэкстензометром Instron 2663-821. Перед началом испытаний на каждый образец наносились специальные маркеры, образец помещался в камеру печи и зажимался в захвате.

Испытания проводились при комнатной температуре при начальной температуре в камере равной 30°C с шагом повышения температуры 20°C до 90°C и выдержкой образца не менее 1000 сек. в установившемся режиме нагрева.

Диаграмма относительного удлинения от времени представлена на рисунке 1. Среднее значение КЛТР для каждой партии образцов представлено в таблице 1.

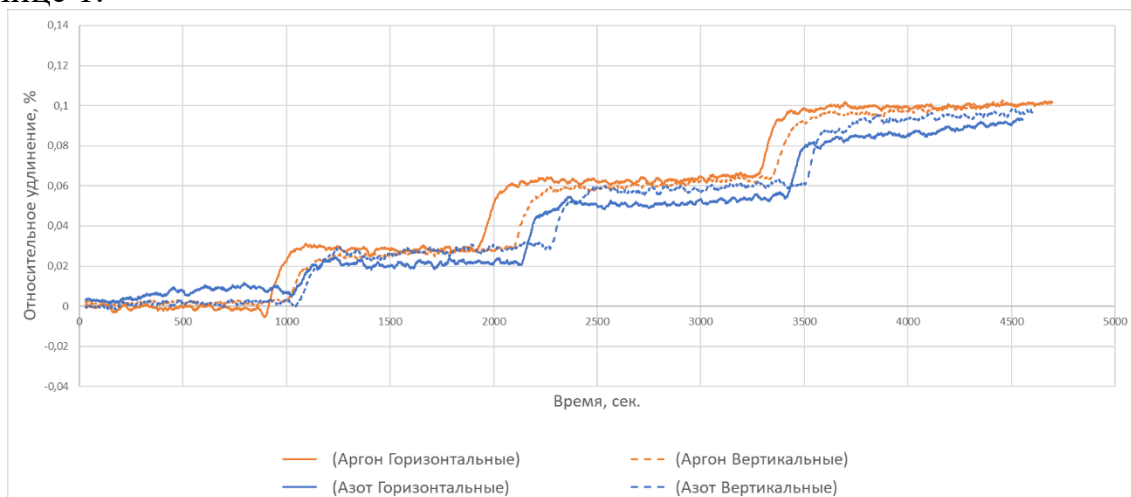


Рис. 1. Диаграмма относительное удлинение от времени.

Таблица 1. Среднее значение КЛТР для каждой партии образцов.

	Аргон горизонтальные	Аргон вертикальные	Азот горизонтальные	Азот вертикальные
Значение КТР	18,73	17,31	16,12	16,65

Значения КЛТР для горизонтальных образцов, напечатанных в среде Аргон выше на 16,19%, по сравнению с образцами, напечатанных в среде Азота. Для вертикальных образцов эта разница составила всего 3,96%. Таким образом, можно сказать, что инертная среда незначительно влияет на значение коэффициента теплового расширения напечатанных образцов. Направление печати также не оказало существенного влияния на значения КТР.

Испытания на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб проводились также на установке Instron 5969 при комнатной температуре.

Результаты испытаний на растяжение экспериментальных образцов из  $AlSi_{10}Mg$  представлены на рисунке 2.

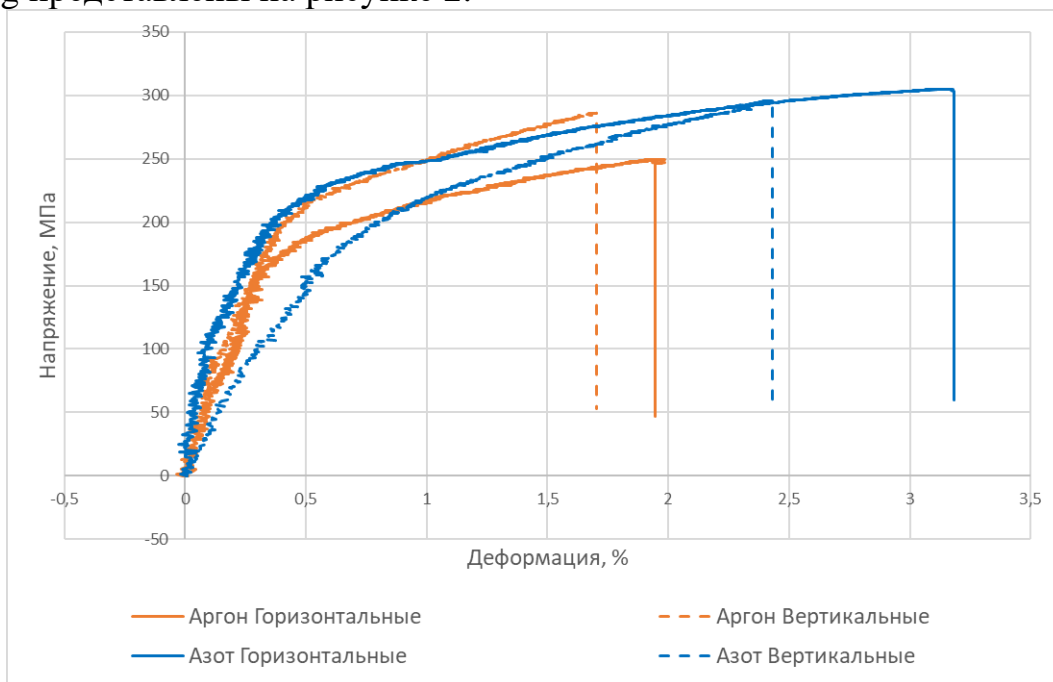


Рис. 2. Усредненная диаграмма напряжение-деформация для образцов из  $AlSi_{10}Mg$

Результаты испытаний на сжатие представлены на рисунке 3.

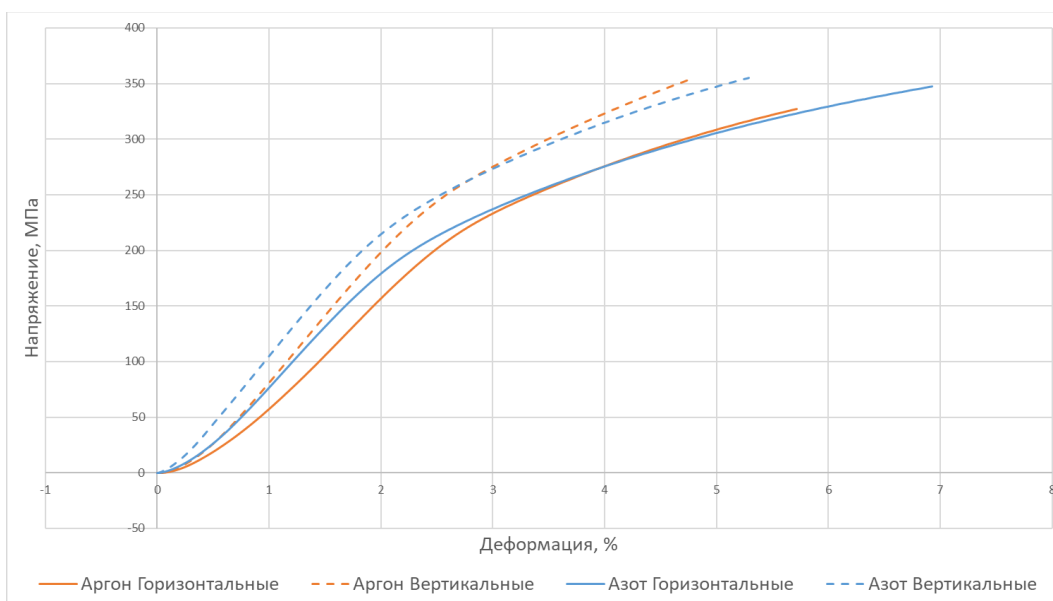


Рис. 3. Усредненная диаграмма напряжение-деформация для образцов из  $AlSi_{10}Mg$ .

Результаты испытаний на трехточечный изгиб представлены на рисунке 4.

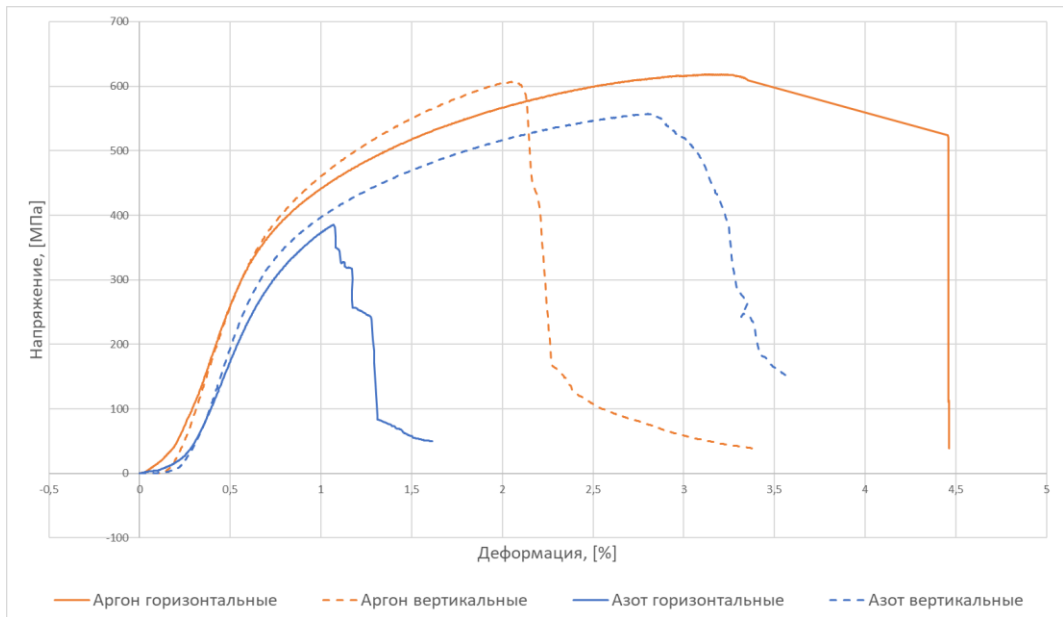


Рис. 4. Усредненная диаграмма напряжение-деформация для образцов из  $AlSi_{10}Mg$ .

**Третья глава** посвящена определению технологических температурных напряжений, возникающих в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления металлопорошковой композиции. Для этого решается вспомогательная задача о нестационарном нагреве изотропного полупространства подвижным поверхностным источником тепла (Рисунок 5).

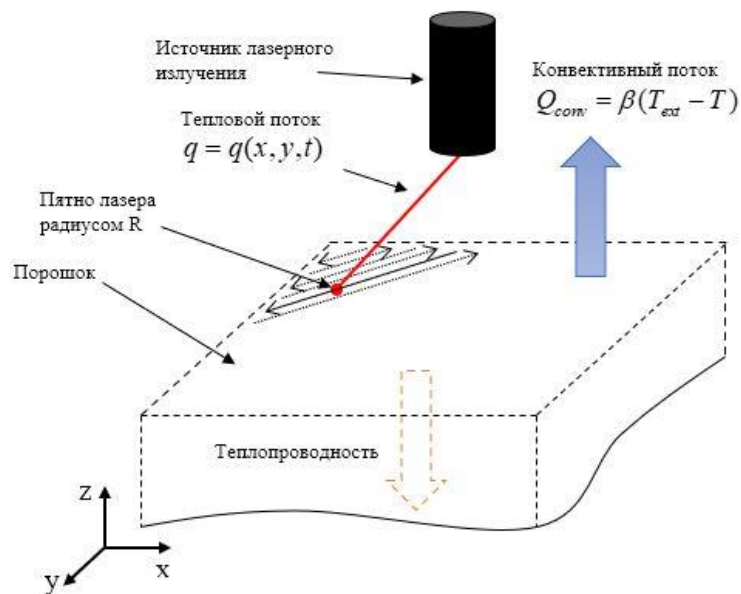


Рис. 5. Постановка задачи о лазерном нагреве полупространства

Полагается, что в начальный момент времени  $t=0$  в начале прямоугольной декартовой системы координат  $Oxyz$ , связанной с поверхностью полупространства  $z \geq 0$  начинает действовать источник тепла



$q$ , который движется по поверхности полупространства  $z = 0$  по произвольному закону от времени. Плотность потока  $q$  распределена по пятну нагрева радиуса  $R$  и в общем случае, может зависеть как от радиуса  $r \in [0, R]$ , так и от времени:

$$q = q(x, y, t) = q(r, t)H(r - R), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

где  $H(\cdot)$  – функция Хевисайда.

Координаты положения центра пятна нагрева в моменты времени  $t > 0$  определяются параметрическими зависимостями

$$x = \varphi(t), \quad y = \psi(t). \quad (2)$$

Среда, заполняющая полупространство, характеризуется удельной теплоёмкостью  $c$ , плотностью  $\rho$  и коэффициентом теплопроводности  $\kappa$ . Полагаем, что среда является однородной и изотропной, а также что плотность и теплофизические постоянные не зависят от температуры. Положим также отсутствие объёмных источников тепла в полупространстве. В этом случае распределение температуры  $T(x, y, z, t)$  в среде подчиняется уравнению теплопроводности:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \Delta T(x, y, z, t), \quad (3)$$

где  $a = \frac{\kappa}{\rho c}$  – коэффициент температуропроводности.

В начальный момент времени температура во всех точках полупространства равна нулю:

$$T(x, y, z, 0) = 0. \quad (4)$$

На поверхности полупространства имеют место граничные условия второго рода. С учётом (1) и (2) они примут вид:

$$-\kappa \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} + \beta T(x, y, z, t) \Big|_{z=0} = q[x - \varphi(t), y - \psi(t), t]. \quad (5)$$

На бесконечности температура полагается ограниченной

$$T(r, t) = O(1), \quad r \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Исходя из принципа суперпозиции решение исходной задачи является свёрткой функции влияния с правой частью граничного условия по переменным  $x$ ,  $y$  и по времени

$$T(x, y, z, t) = \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x-\xi, y-\zeta, z, t-\tau) q[\xi-\varphi(\tau), \zeta-\psi(\tau), \tau] d\xi d\zeta. \quad (7)$$

Непосредственное использование формулы (7) представляет определённые трудности, связанные с вычислением двойного интеграла по пространственным переменным.

Для преодоления этих сложностей был предложен следующий подход. В формуле (7) был совершен переход в подвижную систему координат, связанную с центром пятна нагрева:  $\xi = \xi - \varphi(\tau)$ ,  $\zeta = \zeta - \psi(\tau)$ . Тогда

$$T(x, y, z, t) = \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x-\xi-\varphi(\tau), y-\zeta-\psi(\tau), z, t-\tau) q(\xi, \zeta, \tau) d\xi d\zeta. \quad (8)$$

Положим, что распределение теплового потока  $q$  по поверхности полупространства не зависит от времени и подчиняется закону распределения Гаусса

$$q = q(\xi, \zeta) = \frac{Q e^{-\frac{\xi^2 + \zeta^2}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2}, \quad (9)$$

где  $Q$  – мощность источника лазерного излучения,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

По свойству функции Гаусса  $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi, \zeta) d\xi d\zeta = Q$ . Выбирая то или иное значение среднеквадратического отклонения  $\sigma$  можно регулировать радиус носителя пятна нагрева.

На рисунке 6 изображены графики функции  $q(\xi R, 0)/q_0$ ,  $q_0 = q(0, 0)$  при различных значениях  $\sigma$ . Сплошная кривая соответствует  $\sigma = R/3$ , штриховая –  $\sigma = R/2$ , штрихпунктирная –  $\sigma = R$ .

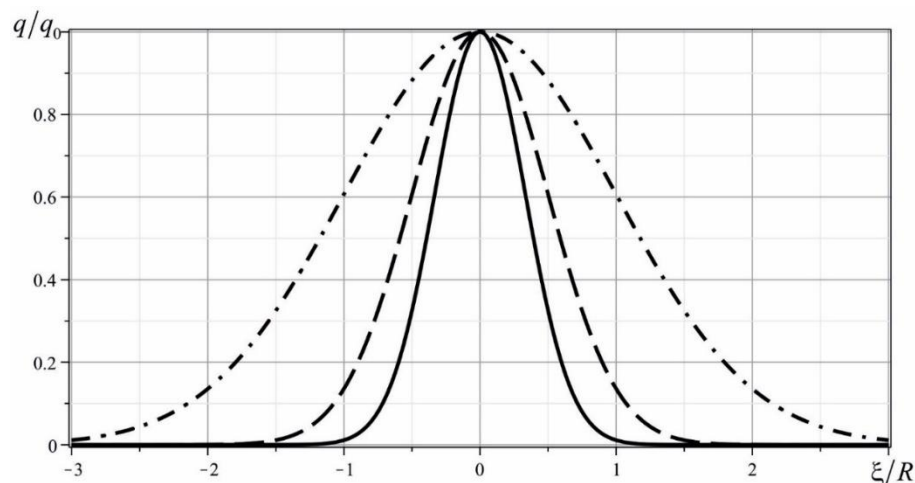


Рис. 6. Распределения теплового потока при различных значениях  $\sigma$

Из рисунка 6 видно, что значение  $\sigma$  следует принять равным  $R/3$ . Это согласуется с известным правилом трёх сигм, согласно которому при

нормальном распределении практически все значения величины с вероятностью 0,9973 лежат не далее трех сигм в любую сторону от математического ожидания, которое в рассматриваемом случае равно нулю.

В результате решения задачи о сосредоточенном источнике тепла на поверхности полупространства был получен оригинал поверхностной функции влияния

$$G(x, y, z, t) = \left[ \frac{e^{-\frac{z^2}{4at}}}{4\kappa a^{1/2} (\pi t)^{3/2}} - \beta \frac{e^{-\frac{t\beta^2 a + \beta z}{\kappa^2 + \kappa}}}{4\kappa^2 \pi t} \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}\beta}{\kappa} \right) \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{4at}}. \quad (10)$$

Заметим, что функция влияния  $G(x, y, z, t)$  является произведением двух сомножителей, первый из которых зависит только от  $z$  и  $t$ , а второй – от  $x$ ,  $y$  и  $t$ :

$$G(x, y, z, t) = G_1(z, t)G_2(x, y, t),$$

$$G_1(z, t) = \frac{e^{-\frac{z^2}{4at}}}{4\kappa a^{1/2} (\pi t)^{3/2}} - \beta \frac{e^{-\frac{t\beta^2 a + \beta z}{\kappa^2 + \kappa}}}{4\kappa^2 \pi t} \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}\beta}{\kappa} \right), \quad (11)$$

$$G_2(x, y, t) = e^{-\frac{x^2 + y^2}{4at}}.$$

С учётом (11) запишем формулу (8) в виде:

$$T(x, y, z, t) = \int_0^t G_1(z, t - \tau) J(x, y, t, \tau) d\tau, \quad (12)$$

$$J(x, y, t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_2(x - \varphi(\tau) - \xi, y - \psi(\tau) - \zeta, t - \tau) q(\xi, \zeta) d\xi d\zeta.$$

Выполнив ряд преобразований над интегралом  $J(x, y, t, \tau)$  получаем:

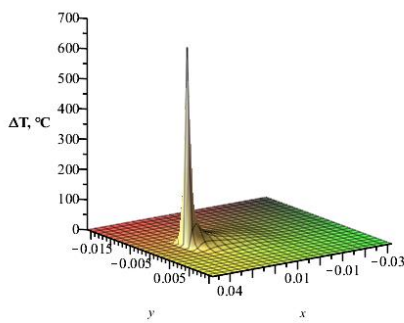
$$J(x, y, t, \tau) = \frac{2Qa(t - \tau)}{\sigma^2 + 2a(t - \tau)} e^{-\frac{(x - \varphi(\tau))^2 + (y - \psi(\tau))^2}{2\sigma^2 + 4a(t - \tau)}}. \quad (13)$$

Таким образом, формула для расчёта поля температуры, индуцированного подвижным источником лазерного излучения с учётом теплоотдачи на поверхности принимает вид одномерного интеграла по времени:

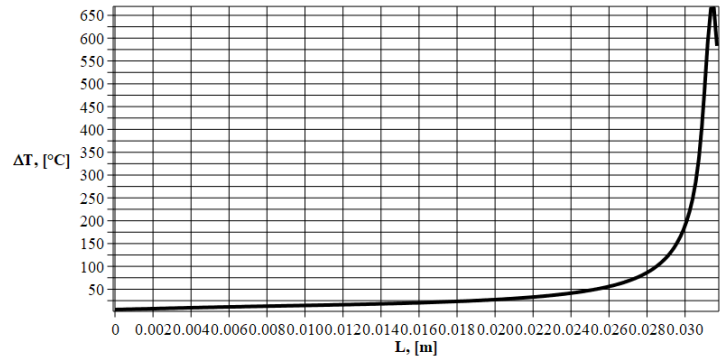
$$T(x, y, z, t) = \frac{Qa}{2\kappa} \int_0^t f(x, y, z, t, \tau) d\tau, \quad (14)$$

$$f(x, y, z, t, \tau) = \frac{e^{-\frac{(x-\varphi(\tau))^2 + (y-\psi(\tau))^2}{2\sigma^2 + 4a(t-\tau)}}}{\sigma^2 + 2a(t-\tau)} \left[ \frac{e^{-\frac{z^2}{4a(t-\tau)}}}{\pi^{3/2}\sqrt{a(t-\tau)}} - \beta \frac{e^{\frac{\beta^2 a}{\kappa^2}(t-\tau) + \frac{\beta z}{\kappa}}}{\kappa\pi} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}} + \frac{\beta\sqrt{a(t-\tau)}}{\kappa}\right) \right].$$

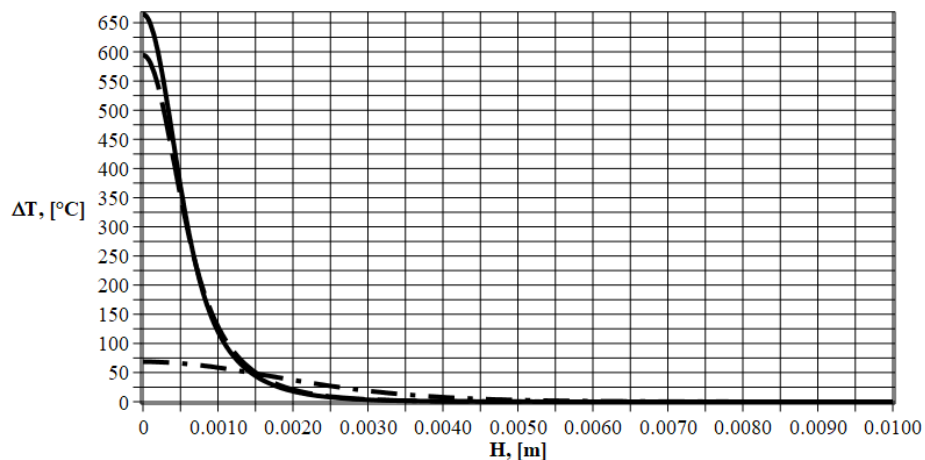
Результаты расчетов для определения распределения температур, приводящих к возникновению температурных напряжений, для прямолинейного движения представлены на рисунке 7.



(а)



(б)



(в)

Рис. 7. Распределение температуры.

а – поверхностное при  $t = t_{\text{кон}}$  ;

б – по поверхности вдоль кривой G-кода при  $t = t_{\text{кон}}$  ;

в – по глубине при  $t = t_{\text{кон}}$  (Сплошная линия соответствует L; штриховая – 0.99L; штрих-пунктирная – 0.7L).

где L – длина кривой G-кода, H – глубина.

Так же рассматривался случай, когда пятно лазерного излучения движется по поверхности по заданной сложной траектории, соответствующей реальной траектории при изготовлении деталей методом селективного

лазерного плавления. Результаты расчетов, а также траектория движения подвижного источника представлены на рисунке 8.

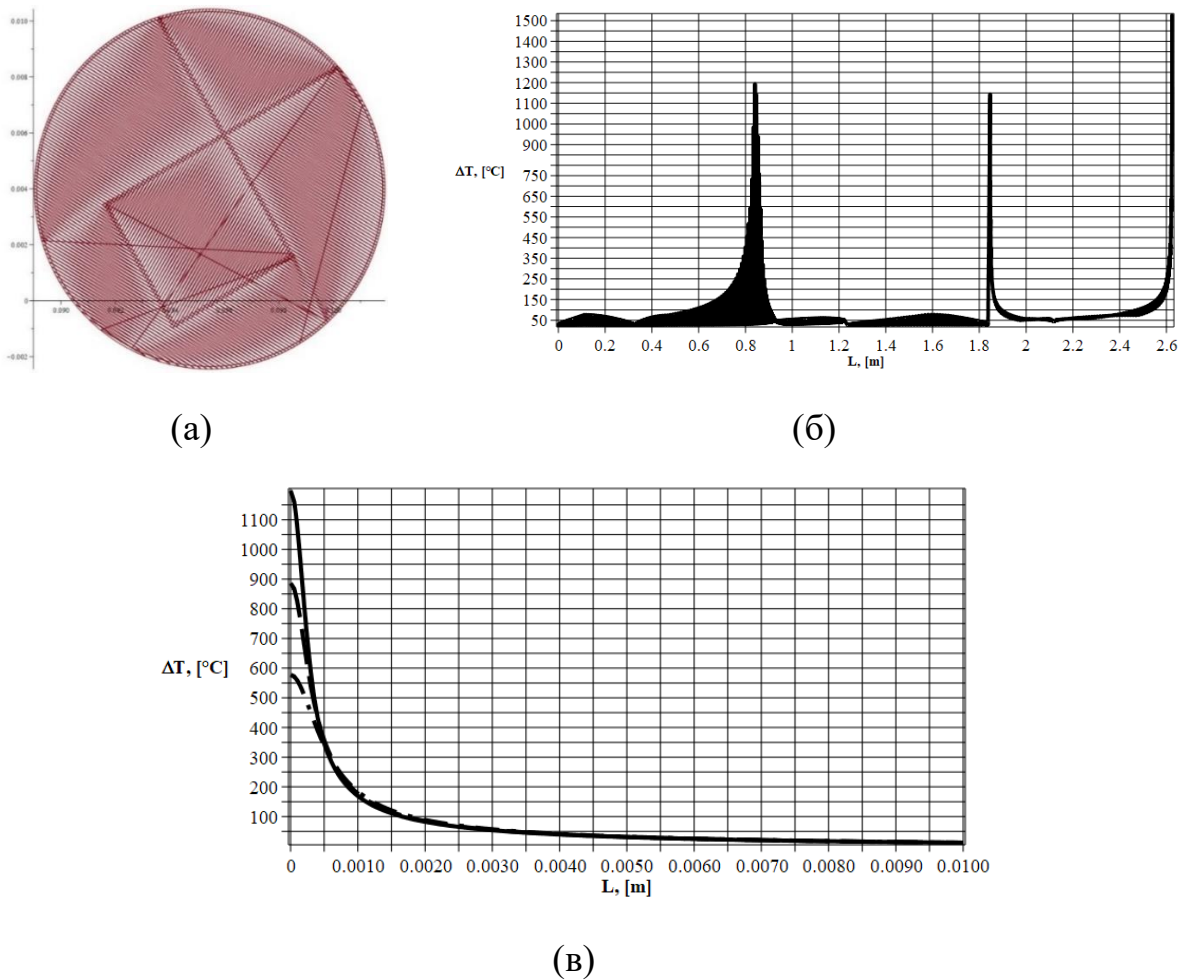


Рис. 8. Распределение температуры для случая сложной траектории. а – траектория движения нагрузки по поверхности; б – вдоль кривой G-кода при  $t = t_{кон}$ ; в – по глубине при  $t = t_{кон}$  (Сплошная линия соответствует  $L$ ; штриховая –  $0.99L$ ; штрихпунктирная –  $0.7L$ ).

С помощью поверхностных функций влияния для термоупругого полупространства можно определить все компоненты напряжённого состояния в полуплоскости при воздействии на её поверхности подвижного источника теплового потока.

Функции влияния  $G_{\alpha\beta}$  ( $\alpha, \beta = x, y, z$ ) была получена в виде несобственных интегралов

$$G_{\alpha\beta}(x, y, z, t) = \frac{1}{8\pi i} \int_{\Lambda-i\infty}^{\Lambda+i\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\alpha\beta}^F(p_1, p_2, z, s) e^{st-i(p_1+p_2)} dp_1 dp_2 ds, \quad \Lambda > 0.$$

Исходя из принципа суперпозиции компоненты напряженного состояния можно представить в виде свёртки функций влияния с функцией, определяющей тепловой поток  $q$  (1) по переменным  $x$ ,  $y$  и по времени

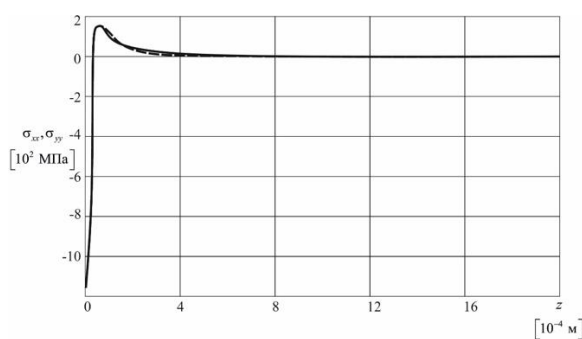
$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\beta}(x, y, z, t) = \\ = \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\alpha\beta}(x - \xi, y - \zeta, z, t - \tau) q[\xi - \varphi(\tau), \zeta - \psi(\tau), \tau] d\tau. \end{aligned} \quad (15)$$

Поставив в соответствие непрерывному времени  $\tau$  дискретные значения с шагом  $\Delta_\tau$ , приближенно заменив подвижную область нагрева сеточной областью  $D_k$  с шагом  $\Delta$  по пространственным переменным  $\xi$  и  $\zeta$ , а функцию  $q(\xi, \zeta, \tau)$  заменив сеточным аналогом  $q_{kij}$  получили численный аналог формулы (15):

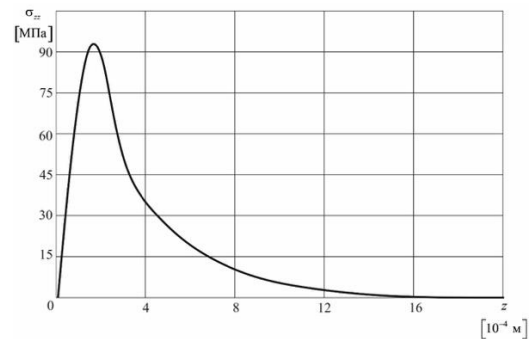
$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\beta}(x, y, z, t) \approx \Delta_\tau \sum_{k=0}^n \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{l_i} q_{ijk} I_{ijk}^{\alpha\beta}, \\ I_{ijk} = \iint_{K_{ijk}} G_{\alpha\beta}(x - \xi, y - \zeta, z, t - \tau_k) ds, \quad q_{ijk} = q\left(\frac{\xi_i + \xi_{i-1}}{2}, \frac{\zeta_i + \zeta_{i-1}}{2}, \tau_k\right). \end{aligned}$$

Для вычисления двумерных интегралов  $I_{ijk}$  по элементарным квадратам  $K_{ijk}$  можно применить какой-либо численный метод, например, метод Гаусса.

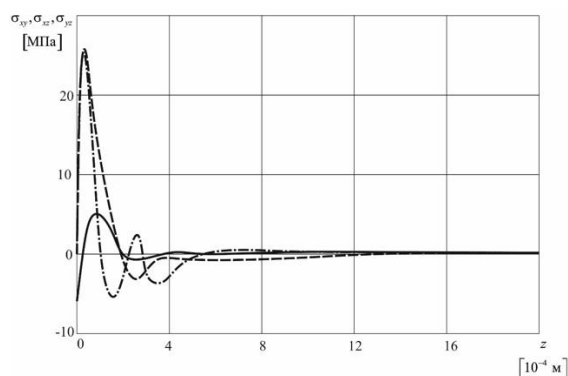
Рассмотрим случай, когда пятно лазерного излучения движется по поверхности полупространства  $z=0$  прямолинейно и с постоянной скоростью. Положим также равенство нулю напряжений и перемещений на поверхности полупространства. Тогда для этого случая распределение напряжений по глубине, возникающих при воздействии на поверхность полупространства нестационарного теплового потока, в конечный момент времени  $t = t_{kon}$ , будет иметь вид, как показано на рисунке 9.



(а)



(б)



(в)

Рис. 9. Распределение напряжений по глубине при  $t = t_{kon}$ .

а –  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$ . Сплошная линия –  $\sigma_{xx}$ ; Пунктирная –  $\sigma_{yy}$ ;

б –  $\sigma_{zz}$ ; в –  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yz}$ . Сплошная линия –  $\sigma_{xy}$ ; пунктирная –  $\sigma_{xz}$ ;  
штрихпунктирная –  $\sigma_{yz}$ .

В рамках конечно-элементного моделирования процесса трехмерной печати методом послойного лазерного синтеза проведено численное моделирование в программных комплексах ANSYS Additive и COMSOL Multiphysics.

Для численного моделирования процесса трехмерной печати методом SLM в среде ANSYS Additive использовалась компоновочная схема для образцов напечатанных на 3D принтере EOS M270. В рамках расчета использовался тип моделирования с учетом анизотропных свойств материала, а также учитывался циклический прогрев растущих тел в процессе печати (Thermal Strain). Общий вид геометрии, используемой в расчете представлен на рисунке 10.

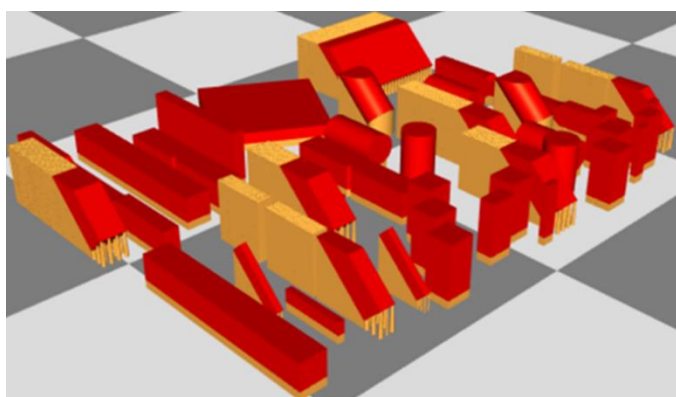


Рис. 10. Используемая геометрия компоновки с поддерживающими структурами.

При моделировании использовалась модель пластического деформирования с динамическим ступенчатым нагружением. Первоначально применялось полное нагружение, и решатель осуществлял итерацию до тех пор, пока не достиг равновесия. Фактор упрочнения принимался равный

0,0178. Предел текучести 760 МПа, модуль упругости 196 ГПа, коэффициент Пуассона 0,272. Коэффициент масштабирования деформации (SSF) принимался по умолчанию равным 1. Используемые коэффициенты анизотропных деформаций используются для представления анизотропного поведения деформаций в системах координат, выровненных с локальными продольными, поперечными и глубинными направлениями сканирования. Положительные значения приводят к несжимаемой базовой деформации (сжатию), отрицательные – к растягивающей деформации (расширению). При моделировании использовались стандартные характеристики: в продольном направлении 1,5; в поперечном направлении 0,5; по нормали к плоскости 1.

Численное моделирование проводилось со следующими параметрами установки трехмерной печати: мощность лазера 195 Вт, диаметр пятна лазера 100 мкм, скорость сканирования 700 мм/с, температура платформы построения 100 °С, толщина слоя детали 20 мкм, толщина слоя для поддержек 30 мкм, начальный угол построения 0°, угол поворота штриховки на каждом новом слое 57°, расстояние между штриховкой 300 мкм.

Результаты расчетов для определения технологических температурных напряжений, возникающих в поддерживающих структурах и в готовых деталях после печати представлены на рисунке 11.

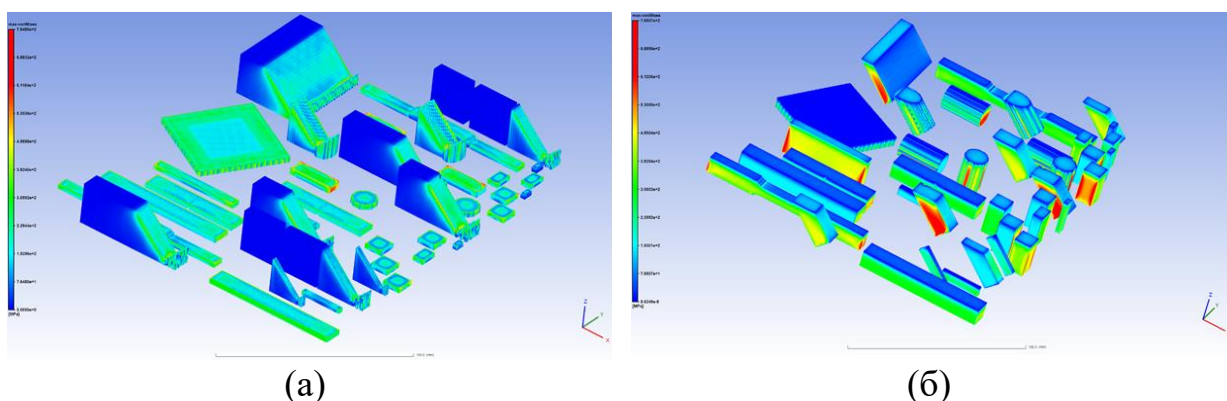


Рис. 11. Максимальные напряжения по Мизесу.  
а – в поддерживающих структурах; б – в деталях.

Численное моделирование технологических температурных напряжений в монослое при изготовлении деталей методом селективного лазерного плавления проведено в конечно-элементном комплексе COMSOL Multiphysics. При моделировании использовались параметры, указанные в таблице 2. Конечно-элементная модель расчетной области представлена на рисунке 12.

Таблица 2. Параметры печати, использованные в расчете

Параметр	Значение
Мощность лазера	300 [W]
Диаметр пятна лазерного излучения	65 [um]
Скорость сканирования	1600 [mm/s]
Толщина слоя	30 [um]
Тип штриховки	Шахматная



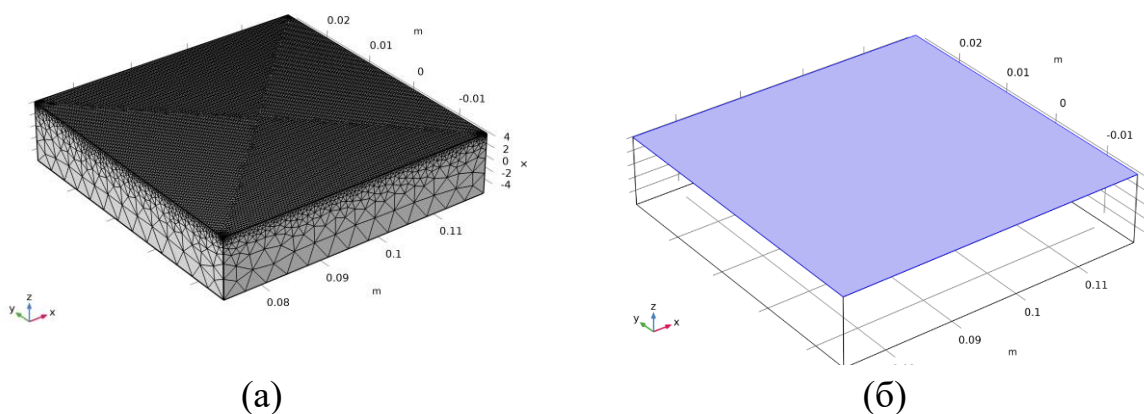


Рис. 12. КЭ модель расчетной области платформы построения (а) и область действия подвижной нагрузки (б).

В начальный момент времени  $t = 0$  температура в любой точке геометрии равна  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На поверхность (рис. 12 б) действует подвижный тепловой поток, который описывается следующим уравнением:

$$Ed = \frac{ni \times Pl}{\pi \times Rb^2} \times e\left(-\frac{2 \times R^2}{Rb^2}\right)$$

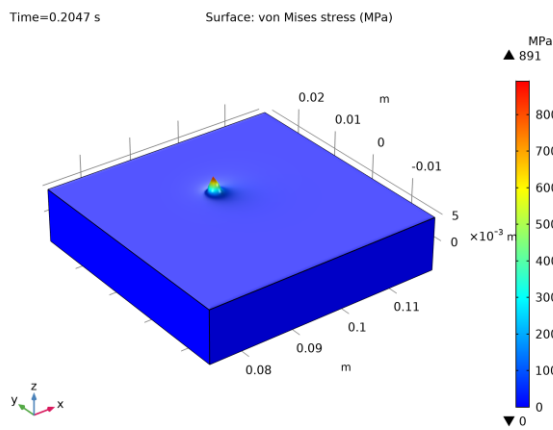
где  $Pl$  – мощность лазера,  $ni$  – коэффициент поглощения лазерного излучения,  $Rb$  – радиус пятна,  $R$  – функция, определяющая положение лазерного пучка в конкретный момент времени.

На поверхности тела, имитирующего слой порошка действуют граничные условия третьего рода:

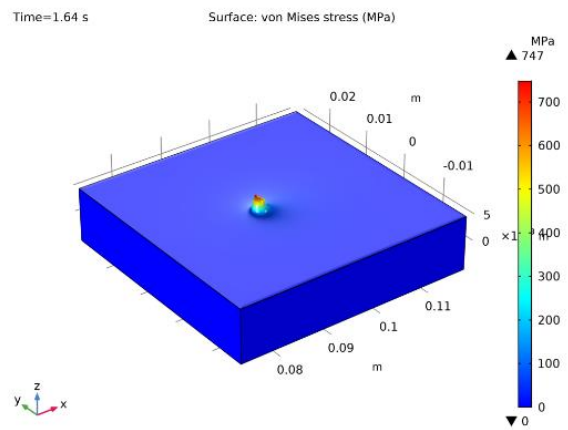
$$q_0 = h(T_{ext} - T),$$

где  $q_0$  – величина теплового потока,  $T_{ext}$  – температура окружающей среды, равная  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T$  – температура.

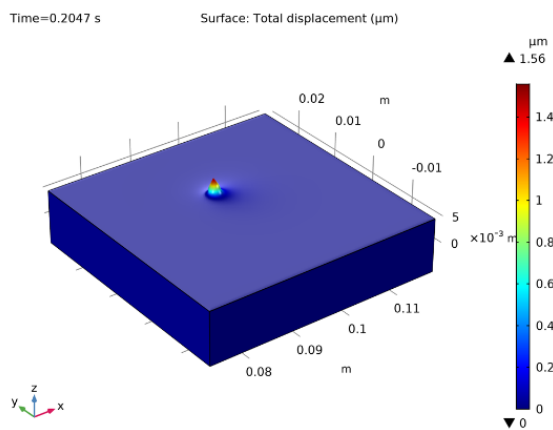
Напряжения по Мизесу и значения перемещений в различные моменты времени для модели круглого сечения показаны на рисунке 13.



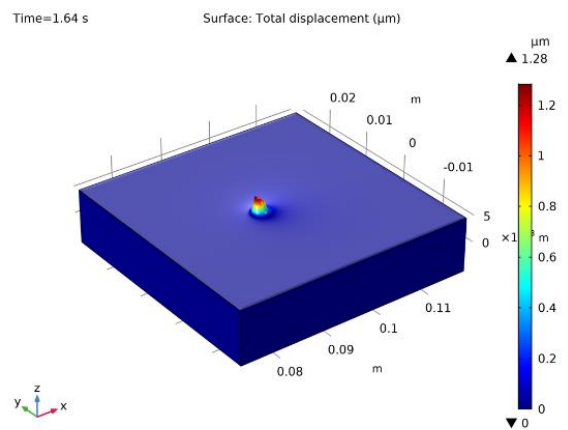
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 13. Значения перемещений и напряжений по Мизесу в различные моменты времени  $t$ .

а, б – напряжения по Мизесу при  $t = 0.2$  сек. и  $t = 1.64$  сек.;

в, г – перемещения при  $t = 0.2$  сек. и  $t = 1.64$  сек.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведены теплофизические и механические испытания экспериментальных образцов из металлопорошковой композиции AlSi10Mg, синтезированных на установке трехмерной печати методом селективного лазерного плавления при различных инертных средах и направлениях печати, получены механические характеристики по результатам испытаний на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб;
2. Получено аналитическое решение задачи о нестационарном нагреве полупространства подвижным источником тепла и предложен численно-аналитический метод определения технологических температурных напряжений в упругом полупространстве, при воздействии на его поверхность подвижного источника тепла;
3. Проведено численное моделирование в пакете Ansys термонапряженного состояния изделий в процессе трехмерной печати методом селективного лазерного плавления с учетом анизотропных свойств материала, а также конечно-элементное моделирование с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics с целью определения технологических температурных напряжений, возникающих в монослое в процессе селективного лазерного плавления металлопорошковой композиции AlSi10Mg с учетом реальных параметров трехмерной печати.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРАЦИИ

### *Статьи в журналах из перечня ВАК:*

1. А.С. Курбатов, А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский. Анализ задачи потери устойчивости тонкостенных конструкций, выполненных методом селективного лазерного спекания, при интенсивном нагреве. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 513-519.
2. С. И. Жаворонок, А. С. Курбатов, А. А. Орехов, Л. Н. Рабинский. Устойчивость панели термоупругой оболочки при действии подвижного точечного краевого источника тепла. СТИН. – 2019. – № 4. – С. 17-20.

### *Статьи в журналах, индексируемых Scopus:*

3. Kurbatov, A.S., Orekhov, A.A., Rabinskiy, L.N. Solution of the problem of thermal stability of a thin-walled structure under non-stationary thermal action arising in the process of creating articles by the method of selective laser sintering (2018) Periodico Tche Quimica, 15 (Special Issue 1), pp. 441-447.

4. Zhavoronok, S.I., Kurbatov, A.S., Orekhov, A.A., Rabinskii, L.N. Stability of Panels of a Thermoelastic Shell Heated at the Edge by a Mobile Point Source (2019) Russian Engineering Research, 39 (9), pp. 793-796. DOI: 10.3103/S1068798X19090259

5. Babaytsev, A.V., Orekhov, A.A., Rabinskiy, L.N. Properties and microstructure of AlSi10Mg samples obtained by selective laser melting (2020) Nanoscience and Technology, 11 (3), pp. 213-222. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020034207

6. A. A. Orekhov, L. N. Rabinskiy, G. V. Fedotenkov, T. Z. Hein. Heating of a Half-Space by a Moving Thermal Laser Pulse Source. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021., Vol. 42., No 8., pp. 1912-1919., DOI 10.1134/S1995080221080229

#### *Прочие публикации по теме диссертации:*

7. Исследование локального теплового и напряженно-деформированного состояния в процессе прямого лазерного осаждения металлов / О. В. Егорова, А. А. Орехов, А. Н. Курбатов, Л. Н. Рабинский // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIV международного симпозиума имени А.Г. Горшкова, Вятчи, 19–23 марта 2018 года. – Вятчи: ООО"ТРП", 2018. – С. 46-47.

8. Анализ влияния геометрических параметров на решение задачи потери устойчивости тонкостенных конструкций, выполненных методом селективного лазерного спекания, при интенсивном нагреве / Е. Л. Кузнецова, А. С. Курбатов, А. А. Орехов, С. И. Жаворонок // Тезисы докладов VII Международного научного семинара "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы", Москва, 12–13 ноября 2018 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: ООО ТРП, 2018. – С. 84-85.

9. Анализ задачи потери устойчивости тонкостенных конструкций, выполненных методом селективного лазерного спекания, при интенсивном нагреве / А. С. Курбатов, А. А. Орехов, Л. Н. Рабинский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 513-519.

10. Решение задачи термоустойчивости тонкостенной конструкции при нестационарном тепловом воздействии, возникающем в процессе создания изделий методом селективного лазерного спекания / А. С. Курбатов, А. А. Орехов, Л. Н. Рабинский // Материалы IV международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов». – Гомель, 2018. – С. 159.

11. Построение тестовых решений для верификации моделей растущих тонкостенных изделий в процессе послойного лазерного синтеза / А. С. Курбатов, А. А. Орехов, Ю.О. Соляев, С.И. Жаворонок // Материалы IV международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов». – Гомель, 2018. – С. 159-160.
12. Построение модели анализа напряженно - деформированного состояния тел, созданных методами аддитивных технологий / А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский // Материалы IX международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». – Гомель, 2019. – С. 241.
13. Свойства и структура образцов из AlSi<sub>10</sub>Mg, полученных методом лазерного спекания порошка / А.В. Бабайцев, А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский // Материалы X международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». – Гомель, 2020. – С. 66.
14. Механические характеристики образцов из AlSi<sub>10</sub>Mg, полученных методом лазерного спекания порошка / А.В. Бабайцев, А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский // Материалы X международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». – Гомель, 2020. – С. 65.
15. Аддитивные технологии при производстве космических аппаратов / А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский // Материалы международной конференции «Космические системы». – Москва, 2021. – С. 46.
16. Моделирование термонапряженного состояния растущего тела в процессе лазерного плавления металла / А.В. Бабайцев, А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXVII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Вятчи, 17–21 мая 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ТРП", 2021. – С. 19
17. Нестационарный нагрев изотропного полупространства подвижным поверхностным источником тепла / А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский, Г.В. Федотенков // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXVII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Вятчи, 17–21 мая 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ТРП", 2021. – С. 179
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619982 Российская Федерация. Программа пересчета и визуализации изменений механических свойств материалов конструкций, выполненных с применением методов аддитивных технологий. АТVIS-1 : № 2018617148 : заявл. 09.07.2018 : опубл. 15.08.2018 / Л. Н. Рабинский, А. А. Орехов, А. С. Курбатов; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610122 Российская Федерация. Программа для оценки теплового состояния элементов конструкций с внутренними полостями и каналами, изготавливаемых методами SLM : № 2018664596 : заявл. 18.12.2018 : опубл. 09.01.2019 / Л. Н. Рабинский, А. А. Орехов, А. В. Бабайцев, Ю. О. Соляев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610096 Российская Федерация. Программа для расчета термонапряженного состояния тонкостенной конструкции цилиндрического типа, изготавливаемой методами аддитивных технологий : № 2019666918 : заявл. 19.12.2019 : опубл. 09.01.2020 / Л. Н. Рабинский, А. А. Орехов, В. Н. Добрянский ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667088 Российская Федерация. Программа для расчета термонапряженного состояния тонкостенной конструкции цилиндрического типа, изготавливаемой методами аддитивных технологий : № 2020666392 : заявл. 10.12.2020 : опубл. 21.12.2020 / Л. Н. Рабинский, А. А. Орехов, В. Н. Добрянский ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).