

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.1-1/-9

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92



### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ПЕЧАТИ ЛОПАТОК ТУРБИН НА 3D-ПРИНТЕРЕ

Ерошенко В.О.<sup>1</sup>, Малькова М.Ю.<sup>1</sup>, Задиранов А.Н.<sup>2</sup>, Мещеряков А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

<sup>2</sup> Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

**Аннотация.** Целью работы является разработка модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере, что особенно актуально при изготовлении деталей сложной геометрической формы, испытывающих воздействие значительных статических, динамических, тепловых нагрузок и работающих в агрессивных средах. Большой разброс механических свойств, который может возникнуть в результате недостаточной подготовки к аддитивному изготовлению детали, указывает на необходимость моделирования с целью прогнозирования механических свойств лопатки газотурбинного двигателя. Таким образом, становится очевидно, что применение моделирования механических испытаний и свойств 3D-печатных объектов является необходимым условием изготовления качественных деталей. Основной задачей исследования является разработка модели лопатки газотурбинного двигателя, обладающей достаточной прочностью, устойчивостью к вибрационным нагрузкам, температурным колебаниям, которая при этом будет сохранять траекторию движения в потоке и обладать минимально возможной массой. Построена трехмерная компьютерная модель для печати лопаток газовых турбин на 3D-принтере. Разработано критериальное и алгоритмическое сопровождение процесса печати лопаток турбин на 3D-принтере. Получена модель распределения теплового поля детали при ее изготовлении с использованием программного комплекса Ansys. Моделирование температурного поля необходимо не только для оценки плотности детали и ее сплошности, но и реакции металла изделия на быстрый нагрев и охлаждение. Получена модель напряженно-деформационного состояния в синтезируемом изделии. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными свидетельствует о валидации разработанной модели. Предлагаемый подход к моделированию позволяет спрогнозировать зоны возникновения максимального напряжения, которое может привести к появлению точки возникновения трещины в изделии.

**Ключевые слова:** лопатка газотурбинного двигателя, аддитивные технологии, оптимизация, моделирование, 3D-печать

© Ерошенко В.О., Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., Мещеряков А.В., 2023

#### Для цитирования

Разработка модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере / Ерошенко В.О., Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., Мещеряков А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## DEVELOPMENT OF A MODEL FOR 3D PRINTING OF TURBINE BLADES

Eroshenko V.O.<sup>1</sup>, Malkova M.Yu.<sup>1</sup>, Zadiranov A.N.<sup>2</sup>, Meshcheryakov A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup> State Fire Fighting Service Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

**Abstract.** The study is aimed at developing a model for printing turbine blades on a 3D printer, which is especially important, when manufacturing complex geometry parts exposed to significant static, dynamic, thermal loads and operating in aggressive environment. A wide spread of mechanical properties, which may arise as a result of insufficient preparation for additive manufacturing of parts, indicates the need for modeling to forecast mechanical properties of a gas turbine engine blade. Thus, it becomes obvious that the use of simulation of mechanical tests and properties of 3D printed objects is a prerequisite for manufacturing high-quality parts. A main objective of the study is to develop a model of a gas turbine engine blade that has sufficient strength, resistance to vibration loads, temperature fluctuations, while maintaining the trajectory of movement in the flow and having minimum possible weight. The authors designed a three-dimensional computer model for printing gas turbine blades on a 3D printer and developed criteria and algorithm support of the process of printing turbine blades. A model of the distribution of the thermal field of the part during its manufacturing is designed using the Ansys software suite. It is required to simulate the temperature field to assess not only density of the part and its continuity, but also the reaction of the metal of the product to quick heating and cooling. The authors obtained a model of the stress-strain state in the synthesized product. A comparison of the simulation results with experimental data indicates validation of the developed model. The proposed approach to modeling makes it possible to forecast zones of maximum stress, which can lead to a crack point in the product.

**Keywords:** gas turbine engine (GTE) blade, additive technologies, optimization, modeling, 3D printing

### For citation

Eroshenko V.O., Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V. Development of a Model for 3D Printing of Turbine Blades. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92>

### Введение

Все более широкое применение в машиностроительной промышленности аддитивных технологий обусловлено возможностью получения изделий повышенного качества и с заданным набором свойств, что особенно актуально при изготовлении деталей сложной геометрической формы, работающих под воздействием комплекса технологических факторов в высоких пределах степени влияния. Авторами работы поставлена цель перевода в аддитивное производство технологии изготовления лопаток газотурбинного двигателя (ГТД). Любое инновационное практическое решение невозможно без разработки критериальных параметров оптимизации процесса и оценки их влияния на жизненный цикл готовой детали [1-5]. Поэтому важными задачами разработки подобной технологии является поэтапная проработка всех стадий подготовительного этапа к аддитивному изготовлению лопаток ГТД и разработка рабо-

чей модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере с учетом всех необходимых требований надежности.

Модель печати лопаток турбин на 3D-принтере подразумевает разработку ряда критериев, которые необходимо соблюсти при получении готовой детали с целью достижения максимальной степени качества. И речь в данном случае идет как о достижении максимального соответствия формы и размеров лопаток, так и о технических стандартах готовых моделей, в том числе характеристиках материала для изготовления готового изделия.

Необходимо выделить ряд управляющих параметров надежности. Ввиду того, что надежность является изменяющейся во времени характеристикой, группа управляющих параметров должна носить исключительно динамический характер и способность к преобразованию, которое не только можно отследить и зафиксировать, но и выделить влияние конкретного фактора на рассматриваемое изделие.

### Постановка задачи исследования

Двумерные эффекты давления потока в пло-  
щади поперечного сечения лопаток ГТД связаны  
с оптимальной производительностью, достигае-  
мой лопатками турбины. Для плавного вращения  
лопатки турбины обычно проектируются с име-  
ющимися аэродинамическими профилями [6].  
При проектировании толщины и длины хорды  
лопаток турбины необходимо учитывать кон-  
структивную прочность лопаток. На предвари-  
тельном этапе создания лопатки турбины необхо-  
димо построить трехмерную компьютерную мо-  
дель. Размер лопатки турбины может быть либо  
получен из исходных данных (справочников /  
технических характеристик, заданных производи-  
телем), либо рассчитан путем моделирования с  
учетом геометрической модели и инженерной  
упругости лопатки турбины. Используемые для  
моделирования характеристики представлены в  
**табл. 1**. Усилие на лопатках турбины измеряется  
при фиксированной выходной мощности двигателя,  
а расчетная нагрузка на лопатку используется  
в качестве условия метода анализа конечных  
элементов для анализа лопатки ГТД [7].

Таблица 1. Характеристики, используемые  
для моделирования лопатки ГТД  
Table 1. Characteristics used for modeling GTE  
blades

Наименование	Параметр
Материал	В зависимости от модели ГТД
Количество моделей на разовое использование моделей	До 10 000
Плотность изделия	В зависимости от модели ГТД
Предел текучести	20 МПа
Предел прочности на растяжение	29,6 МПа
Модуль Юнга	2,24 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,38
Модуль сдвига	0,811594 ГПа

Кроме того, для моделирования необходим  
расчет среды, основанный на теории вязкого  
течения в соответствии с уравнением Рейнольдса  
(RANS), согласно которому однородный поток  
для поддержания определенной скорости вокруг  
гребного винта является типичной трехмерной  
несжимаемой турбулентной жидкостью [8]. Вы-  
ражение RANS для всего вычислительного поля  
потока выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad (2)$$

где  $\rho g_i$  – осредненные внешние силы;  
 $\mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  – вязкостные силы;  $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$  –  
напряжения Рейнольдса, турбулентные напря-  
жения;  $\rho$  – плотность.

Область расчета потока должна включать две  
части фиксированной и вращающейся области,  
чтобы обеспечить расчет в нормальном состоя-  
нии. Конструкция геометрии 3D-моделирования  
должна быть задана как неподвижный объект в  
подвижном, а лопасти турбины установлены во  
вращение [9]. Набор для моделирования поверх-  
ности лопастей определяется как нескользящая  
поверхность, лопатка турбины, помещенная в  
поток, и размер лопасти в соответствии с разме-  
ром аквариума (рис. 1). При моделировании  
толщина лопатки турбины рекомендована к  
установке на 2,5 мм, материал набора моделиро-  
вания не определен.

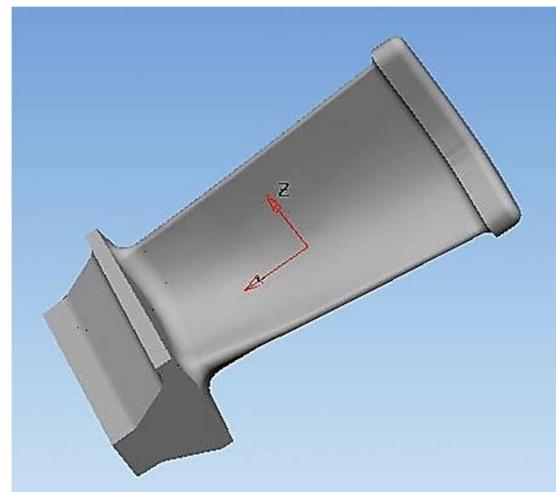


Рис. 1. Пример возможного моделирования лопатки  
Fig. 1. An example of a possible blade modeling

Таким образом, процесс создания модели ло-  
патки требует учета не только параметров ло-  
патки, но и внешних воздействий, оказываемых  
на лопатку.

## Материалы и методы исследования

**1. Моделирование температурных полей в синтезируемом изделии.** При использовании технологии 3D-печати на качество готовой детали преимущественно влияет печатающая головка, которая определяет качество печати [10]. В зависимости от используемого материала ее необходимо нагреть до стабильной температуры от 275°C. Металл или металлический сплав подается в печатающую головку в виде проволоки, обычно диаметром 3 или 1,75 мм. Подача материала на печатающую головку осуществляется приводом, обеспечивающим подачу. Скорость подачи определяется скоростью печатающей головки и выходным диаметром струи по формуле [11]

$$f_f = f_{\min} \frac{d^2}{D^2}, \quad (3)$$

где  $f_f$  – скорость подачи материала;  $f_{\min}$  – скорость подачи печатающей головки;  $d$  – диаметр выходного материала;  $D$  – диаметр проволоки.

Исходя из организации процесса получения детали и нахождения ее в камере, можно предположить, что тепловое поле будет распределено так, как показано на **рис. 2** [12].

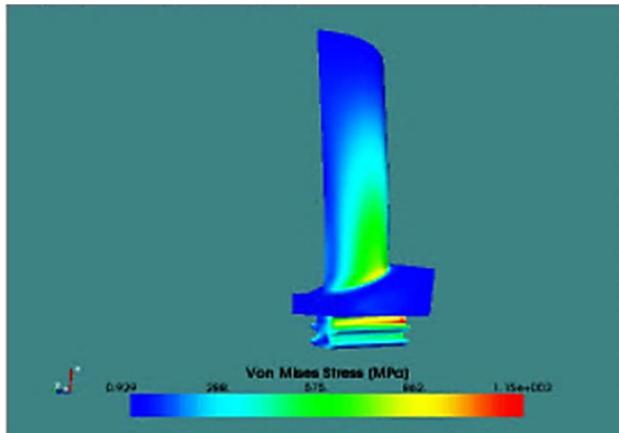


Рис. 2. Распределение теплового поля детали при ее изготовлении

Fig. 2. Distribution of the thermal field of the part during its manufacturing

В глобальной декартовой системе можно определить уравнение теплового потока:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где  $\ddot{q}$  – тепло, выделяемое в системе;  $x, y, z$  – направление декартовой системы;  $T$  – температура в зависимости от координат и времени, °C, K;  $t$  – время, с;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж · кг<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>;  $\rho$  – плотность, кг · м<sup>-3</sup>;  $K$  – теплопроводность, Вт · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>.

Потери энергии из-за излучения можно определить уравнением Сигала-Хаузлла:

$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N \left( \delta_{ji} - F_{ji} \right) \rho T_i^4, \quad (5)$$

где  $N$  – количество излучающих поверхностей;  $\delta_{ji}$  – символ Кронекера ( $\delta_{ji} = 1$  для  $i = j$ , иначе  $\delta_{ji} = 0$ );  $\varepsilon_i$  – эффективная излучательная способность;  $F_{ji}$  – доля энергии, излучаемой от поверхности  $i$  к поверхности  $j$ ;  $A_i$  – площадь поверхности  $i$ ;  $Q_i$  – потери энергии поверхности  $i$ ;  $\delta$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T_i$  – абсолютная температура поверхности  $i$ .

Для расчета распределения температурного поля возможно использовать программные комплексы по типу Ansys. Для расчета должен использоваться «установившийся тепловой модуль», так как данный модуль однотипен для программных комплексов такого рода. В первую очередь оценивалось распределение температурного поля внутри изделия [13].

При расчетах необходимо учитывать такие свойства материалов, как теплопроводность и теплоотдача, включая теплообмен между отдельным телом и окружающей средой. Кроме того, результирующая теплопередача зависит от формы тела и характеристик его поверхности.

Прогресс температуры для лопаток рассчитывался исходя из двух вариантов исходных данных [14]:

а) за исходную принималась температура самой печатающей головки;

б) за исходную принималась температура проволоки.

Распределение полей показано на **рис. 3**.

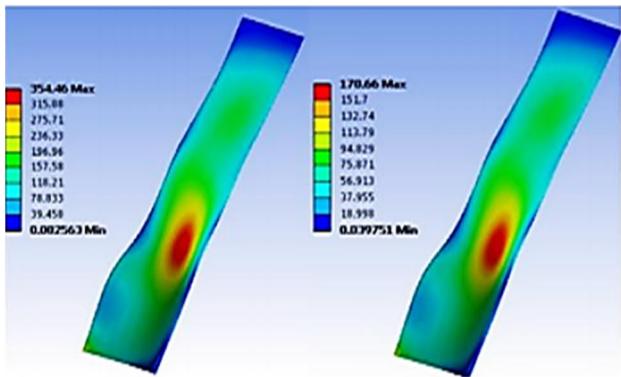


Рис. 3. Распределение тепловых полей в зависимости от пути моделирования

Fig. 3. Distribution of thermal fields depending on the modeling path

На первый взгляд, рисунки практически идентичны, но моделирование по параметру (а) указывает на то, что температурное поле менее равномерно распределено по сечению детали, имеются более контрастные участки. Связано это с конструктивными особенностями головок. Например, для частей печатающей головки, подвергающихся механической нагрузке, вместо материала PTFE может использоваться материал PEEK с целью улучшения механических свойств печатающей головки. Оба материала имеют одинаковую теплопроводность и их можно использовать в качестве теплоизоляции металлических частей печатающей головки [15].

Таким образом, моделирование температурного поля необходимо не только для оценки плотности деталей и их сплошности, но и реакции металла на быстрый нагрев и охлаждение [16]. Изучив характеристики температурного поля путем моделирования, можно подобрать характеристики процесса: форсунку подачи материала, характер подачи материала, расстояние до платформы, скорость подачи температуры и другие технологические параметры процесса, которые позволят получить качественный результат даже при работе с новыми деталями. Использование стандартных подходов физического моделирования в сочетании с программными комплексами позволит получить модель и характеристики процесса для достижения оптимального результата.

**2. Моделирование напряженно-деформационного состояния в синтезируемом изделии.**  
На практике доказано, что плотность наполнения и форма существенно влияют на механические свойства образцов лопаток ГТД, созданных с помощью 3D-принтера. Из основ теоретиче-

ской механики и сопромата следует, что прочность на разрыв и эластичность прямо пропорциональна плотности используемого материала и что детали с концентрическими частями внутренней формы имеют самую высокую прочность на разрыв и эластичность среди образцов линейной, решетчатой или кристаллической формы. Для лопаток ГТД, произведенных классическим способом, доказано, что образцы обладали большей прочностью на растяжение при нагрузке в направлении экструзии. После проведения испытаний на одноосное растяжение образцов доказано, что предел растяжения является ключевым параметром энергии, необходимой для межслоевого разрушения. Также было обнаружено, что растягивающие остаточные напряжения и площадь межслоевого контакта существенно влияют на энергию разрушения [17].

Большой разброс механических свойств, который может возникнуть в результате недостаточной подготовки к аддитивному изготовлению детали, указывает на необходимость моделирования с целью прогнозирования механических свойств лопатки ГТД [18]. Для определения механических свойств материала обычно используют несколько методов тестирования. Наиболее распространенные механические испытания включают испытания на одноосное сжатие, сжатие при плоской деформации и одноосное растяжение. Испытание на одноосное растяжение используется наиболее часто и обеспечивает точные значения ключевых механических параметров, таких как модуль Юнга, предел текучести, предел прочности при растяжении, удлинение при разрыве и коэффициент Пуассона. Тем не менее получены выводы, что используемые в настоящее время процедуры оценки механических свойств 3D-печатных объектов с дальнейшим использованием результатов при корректировке программы печати не гарантируют получение изделия с необходимым комплексом параметров, которые нельзя было бы эффективно установить в численном моделировании [19]. Таким образом, становится очевидно, что применение моделирования механических испытаний и свойств 3D-печатных объектов является необходимым условием изготовления качественных деталей. Многочисленные исследования указывают на проблемы, связанные с точным моделированием механических свойств лопаток ГТД, подчеркивая необходимость дополнительных исследований в направлении моделирования.

Трехмерная модель образца может быть построена с использованием любого программного обеспечения, используемого для этих целей, в соответствии с геометрией испытуемого образца (рис. 4). Поскольку образец лопатки ГТД, напечатанный на 3D-принтере, является тонкостенным, для упрощения расчетов, сокращения времени решения задачи и предотвращения потенциальных проблем с сеткой возможно использовать модель средней поверхности [20].



Рис. 4. Образец лопатки ГТД для моделирования  
Fig. 4. A sample of a GTE blade for modeling

Сетка криволинейных участков имеет больше узлов, чем стандартизированная сетка программы, она способствует получению высокоточных результатов. Скорость деформации может быть установлена на любом уровне, полученным в ходе практического применения лопаток, например на уровне 3 мм/мин. Необходимо отметить, что наиболее оптимальным в таком случае является установление максимально возможных и неблагоприятных нагрузок [21]. Модель строится таким образом, чтобы растягивающая нагрузка прикладывалась к образцу сверху, а нижняя часть фиксировалась для имитации относительного одноосного движения между верхним и нижним захватами машины для испытания на растяжение [22].

Численный метод с построением сетки и граничными условиями представлен на рис. 5. Модель пластиичного материала фон Мизеса может

быть использована для определения нелинейного поведения материала. Модель материала может быть построена с использованием механических и физических свойств и данных кривой напряжения-деформации, взятых из литературных источников [23]. Предел текучести определен на основе деформации смещения и составляет 0,2%.

Зададим геометрические параметры лопатки ГТД, например, лопатки турбины толщиной 2,5, 2 и 3 мм. Эффективная деформация равномерно распределяется на кромке турбинной лопатки с минимальной эффективной деформацией 0,005 и максимальной эффективной деформацией 5,97. Минимальное эффективное напряжение составляет 0,0001 МПа, а максимальное – 0,1436 МПа.

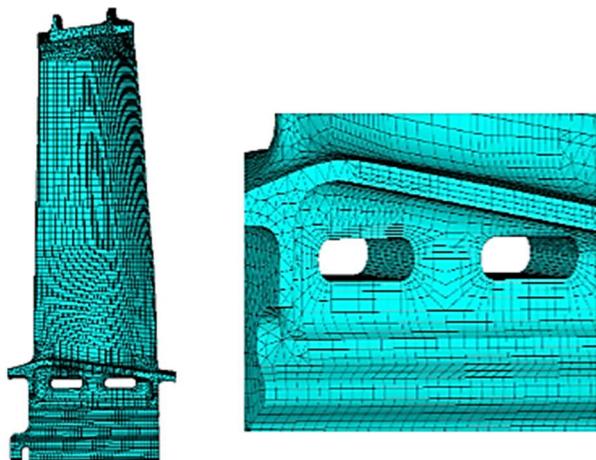


Рис. 5. Моделирование лопатки и создание сетки  
Fig. 5. Blade modeling and meshing

Для учета разрушающих деформаций и напряжений может быть применена спектральная характеристика. Сравнение полученных данных на первоначальных этапах должно производиться исключительно с реальными данными до создания полностью независимой системы. Обязательным является моделирование растягивающей нагрузки на образец до точки непосредственно перед разрушением.

### Обсуждение полученных результатов

Анализ чувствительности сетки проводится для оценки влияния размера сетки на напряжение по Мизесу и результирующее смещение. Результаты анализа, представленные на рис. 6, показывают, что показатели напряжения и смещения существенно не изменяются в пределах интересующего диапазона элементов сетки, что свидетельствует о надежности изделия.

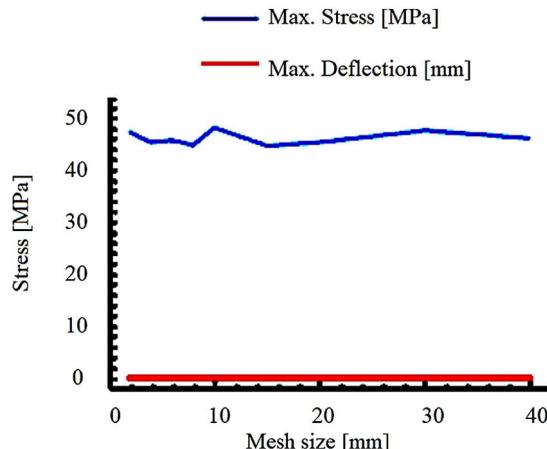


Рис. 6. Максимальное напряжение по Мизесу и максимальное результирующее смещение лопатки ГТД, рассчитанные по сетке

Fig. 6. Maximum von Mises stress and maximum resulting displacement of the GTE blade calculated by the mesh

Из **рис. 6** видно, что максимальное напряжение по Мизесу незначительно варьируется в зависимости от результатов испытаний на смещение [24]. Анализ рисунка также позволяет сделать вывод, что качество разбитой сетки приемлемо только для рассматриваемой детали, где ширина детали меньше, чем ее длина. С другой стороны, диаграмма Якоби (**рис. 7**) показала положительные значения, что свидетельствует о том, что в лопатке, полученной по результатам данного моделирования, искажения или другие нарушения отсутствуют.

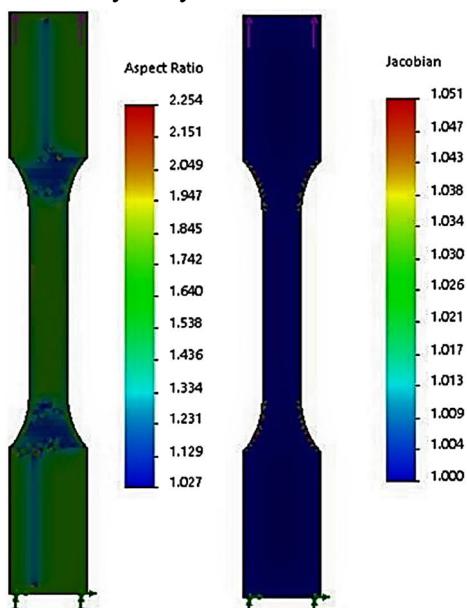


Рис. 7. Контрольные диаграммы сетки, используемые в моделировании: соотношение сторон (слева), якобиан (справа)

Fig. 7. Mesh control diagrams used in modeling: aspect ratio (left), Jacobian (right)

Также можно отметить, что точка максимального напряжения была расположена на средней линии образца в зоне сужения, как показано на **рис. 7**. Используя данный подход к моделированию, можно спрогнозировать зоны максимального напряжения, которые могут привести к появлению точки возникновения трещины [25].

Кривые «напряжение – деформация», смоделированные методом наименьших квадратов, показаны на **рис. 8**.

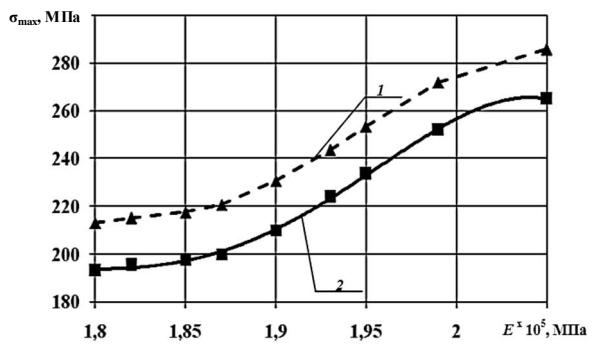


Рис. 8. Зависимость максимальных динамических напряжений в лопатках от модуля Юнга  $E$ : 1 – расчетная зависимость; 2 – расчет с использованием ANSYS

Fig. 8. Dependence between maximum dynamic stresses in the blades and Young's modulus  $E$ : 1 is calculated dependence; 2 is calculation using ANSYS

Как и ожидалось, кривая одноосного растяжения начинается с упругой зоны, в которой растягивающее напряжение имеет линейную зависимость от приложенной деформации. Линейная зона указывает на диапазон напряжения-деформации, в котором материал восстанавливает свою первоначальную форму после снятия приложенного напряжения или деформации. Линейная зона продолжает выходить за границы предела текучести, по достижении которого в образце происходит пластическая деформация и он не может восстановить первоначальную форму даже после снятия приложенного напряжения / деформации. Зона пластической деформации продолжается до разрыва образца. Предел прочности при растяжении составил 46,18 МПа, а предел текучести, который был оценен с использованием метода смещения 0,2%, составил 15,7 МПа [26].

Как видно из **рис. 9**, смоделированный и экспериментально полученный профили напряжения-деформации почти перекрывались и демонстрировали одинаковые наклоны и тенденции во всем диапазоне. Значения текучести и предела прочности очень близки друг к другу.

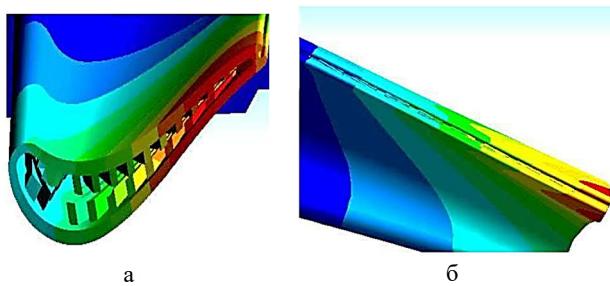


Рис. 9. Профиль напряжения-деформации по статистическим данным (а) и экспериментально полученный профиль напряжения-деформации (б)

Fig. 9. Stress-strain profile according to statistical data (a) and the experimentally obtained stress-strain profile (b)

Значительным преимуществом подобного подхода к моделированию является то, что при его применении ошибка в определении предела текучести составляет  $\sim 2\%$ , а погрешность предела прочности при растяжении – около 7%. Эти результаты указывают на валидацию модели, полученной указанным способом моделирования.

## Выводы

Разработана трехмерная компьютерная модель для печати лопаток газовых турбин на 3D-принтере. Для моделирования проведен расчет среды, основанный на теории вязкого течения в соответствии с уравнением Рейнольдса (RANS). Получено уравнение RANS для всего вычислительного поля. Получена модель распределения теплового поля детали при ее изготовлении с использованием программного комплекса Ansys.

Прогресс температуры для лопаток рассчитывался исходя из двух вариантов исходных данных: в первом варианте за исходную принималась температура самой печатающей головки, во втором варианте – температура проволоки.

Построена модель напряженно-деформационного состояния в синтезируемом изделии с использованием модели средней поверхности. Результаты анализа модели по Мизесу свидетельствуют о надежности изделия. Анализ модели с использованием диаграммы Якоби также показал отсутствие искажений в лопатке, полученной по результатам данного моделирования. Смоделированный и экспериментально полученный профили напряжения-деформации продемонстрировали одинаковые тенденции во всем диапазоне моделирования, что говорит о валидации разработанной модели. Значительным преимуществом подобного подхода к моделиро-

ванию является то, что при его применении ошибка в определении предела текучести составляет  $\sim 2\%$ , а погрешность предела прочности при растяжении – около 7%. Предлагаемый подход к моделированию позволяет спрогнозировать зоны максимального напряжения, которые могут привести к появлению точки возникновения трещины в изделии.

## Список источников

1. Лехов О.С., Михалев А.В., Билалов Д.Х. Исследование совмещенного процесса получения сортовых заготовок на установке непрерывного литья и деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №2. С. 56-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-56-61>
2. Особенности моделирования высокоэффективной многоступенчатой парокомпрессионной теплонасосной установки / Антипов Ю.А., Шаталова И.И., Шкарин К.В. и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. №4. С. 339-347. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347
3. Мамаев В.К., Виноградов Л.В., Ощепков П.П. Моделирование решетки профилей транспортного газотурбинного двигателя // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. №2. С. 140-146. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146
4. Корнилова А.В., Заяр Ч. Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. №4. С. 308-315. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315
5. Расчетное определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля посредством моделирования процесса статических испытаний / Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Смирнов А.В., Михайловский И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. №2. С. 23-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31>
6. Dawoud M., Taha I., and Ebeid S.J. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques // Journal of Manufacturing Processes. 2016, vol. 21, pp. 39-45.
7. Geng L., Wu W., Sun L., Fang D. Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D re-entrant lattices based on in-situ CT testing and geometric reconstruction // Int J Mech Sci. 2019, vol. 157-158, pp. 231-242.
8. Iñigo Flores Ituarte, Eric Coatanea, Mika Salmi, Jukka Tuomi, Jouni Partanen, Additive manufacturing in production: a study case applying technical requirements // Physics Procedia. 2015, vol. 78, pp. 357-366.

9. Li C., Denlinger E.R., Gouge M.F., Irwin J.E., Michaleris P. Numerical verification of an Octree mesh coarsening strategy for simulating additive manufacturing processes // *Additive Manuf.* 2019, vol. 30, no. 3, pp. 100903.
10. Liu J., Sun L., Xu W., Wang Q., Yu S., Sun J. Current advances and future perspectives of 3D-printing natural-derived biopolymers // *Carbohydr Polym.* 2019, vol. 207, pp. 297-316.
11. Montero M., et al. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments // *Society of Manufacturing Engineers*, 2001, vol. 10 (13552540210441166).
12. Pastor-Artigues M.-M., Roure-Fernández F., Ayneto-Gubert X., Bonada-Bo J., Pérez-Guindal E., Buj-Corral I. Elastic Asymmetry of PLA Material in FDM-Printed Parts: Considerations Concerning Experimental Characterisation for Use in Numerical Simulations // *Materials*. 2020, vol. 13, no. 1, p. 15.
13. Quan H., Zhang T., Xu H., Luo S., Nie J., Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges // *Bioactive Materials*. 2020, vol. 5, pp. 110-115.
14. Rodríguez J.F., Thomas J.P., and Renaud J.E. Design of Fused-Deposition ABS Components for Stiffness and Strength // *Journal of Mechanical Design*, 2003, vol. 125, no. 3, pp. 545-551.
15. Sood A.K., Ohdar R.K., and Mahapatra S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts // *Materials & Design*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 287-295.
16. Seno T., Ohtake Y., Kikuchi I.Y., Saito N., Suzuki H., Nagai Y. 3D scanning based mold correction for planar and cylindrical parts in aluminum die casting // *Journal of Computational Design and Engineering*. 2015, vol. 2, no. 2, pp. 96-104.
17. Webb B and Doyle B.J. Parameter optimization for 3D bioprinting of hydrogels // *Bioprinting*. 2017, vol. 8, pp. 8-12.
18. Yao T., Ye J., Deng Z., Zhang K., Ma Y., Ouyang H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: experimental and theoretical analyses // *Composites. Part B: Engineering*. 2020, vol. 188, pp. 107894.
19. Zou R., et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material // *Composites. Part B: Engineering*, 2016, vol. 99, pp. 506-513.
20. Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho M.A. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: a comparative analysis, materials // *J Manuf Mater Process*. 2018, vol. 11, p. 64.
21. Petersmann S., Spoerk M., Van De Steene W., Üçal M., Wiener J., Pinter G., Arbeiter F. Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing // *J Mech Behav Biomed Mater.* 2020, vol. 104, p. 103611.
22. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges // *Composites. Part B: Engineering*. 2018, vol. 143, pp. 172-196.
23. Murr L.E. Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication // *Journal of Materials Science & Technology*. 2016, vol. 32, iss. 10, pp. 987-995.
24. Kafara M., Kemnitzer J., Westermann H.H. and Steinhilper R. Influence of Binder Quantity on Dimensional Accuracy and Resilience in 3D-Printing // *Procedia Manufacturing*. 2018, vol. 21, pp. 638-646.
25. Hu Z., Chen F., Xu J., Nian Q., Line D., Chen C., Zhu X., Chen Y. and Zhang M. 3D printing graphene-aluminum nanocomposites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, vol. 746, pp. 269-276.
26. Melenka, G.W., et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures // *Composite Structures*. 2016, vol. 153, pp. 866-875.

## References

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Bilalov D.Kh. Studies on a combined process of producing billets on a continuous casting and deformation plant. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(2):56-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-56-61>. (In Russ.)
2. Antipov Yu.A., Shatalova I.I., Shkarin K.V. et al. Features of modeling of a highly efficient multistage vapor compression heat pump unit. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research]. 2021;22(4):339-347. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347. (In Russ.)
3. Mamaev V.K., Vinogradov L.V., Oshchepkov P.P. Modeling of the set of blade profiles of a gas turbine engine. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research]. 2019;20(2):140-146. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146. (In Russ.)
4. Kornilova A.V., Zaya K. Determination of acceptable parameters of defects in basic parts of forging and pressing machines. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research]. 2019;20(4):308-315. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315. (In Russ.)
5. Gun I.G., Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Smirnov A.V., Mikhailovsky I.A. Calculation of starting force of plastic deformation, when bending an outer tie rod ball stud, by the simulation of static tests. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):23-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31>. (In Russ.)

6. Dawoud M., Taha I., Ebeid S.J. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016;21:39-45.
7. Geng L., Wu W., Sun L., Fang D. Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D reentrant lattices based on in situ CT testing and geometric reconstruction. *Int J Mech Sci*. 2019;157-158:231-242.
8. Iñigo Flores Ituarte, Eric Coatanea, Mika Salmi, Jukka Tuomi, Jouni Partanen. Additive manufacturing in production: a study case applying technical requirements. *Physics Procedia*. 2015;78:357-366.
9. Li C., Denlinger E.R., Gouge M.F., Irwin J.E., Michaleris P. Numerical verification of an Octree mesh coarsening strategy for simulating additive manufacturing processes. *Additive Manuf*. 2019;30(3):100903.
10. Liu J., Sun L., Xu W., Wang Q., Yu S., Sun J. Current advances and future perspectives of 3D printing natural-derived biopolymers. *Carbohydr Polym*. 2019;207:297-316.
11. Montero M. et al. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. *Society of Manufacturing Engineers*. 2001;10 (13552540210441166).
12. Pastor-Artigues M.-M., Roure-Fernández F., Ayneto-Gubert X., Bonada-Bo J., Pérez-Guindal E., Buj-Corral I. Elastic asymmetry of PLA material in FDM-Printed Parts: Considerations concerning experimental characterisation for use in numerical simulations. *Materials*. 2020;13(1):15.
13. Quan H., Zhang T., Xu H., Luo S., Nie J., Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*. 2020;5:110-115.
14. Rodríguez J.F., Thomas J.P., Renaud J.E. Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength. *Journal of Mechanical Design*. 2003;125(3):545-551.
15. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*. 2010;31(1):287-295.
16. Seno T., Ohtake Y., Kikuchi I.Y., Saito N., Suzuki H., Nagai Y. 3D scanning based mold correction for pl-
- nar and cylindrical parts in aluminum die casting. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2015;2(2):96-104.
17. Webb B., Doyle B.J. Parameter optimization for 3D bioprinting of hydrogels. *Bioprinting*. 2017;8:8-12.
18. Yao T., Ye J., Deng Z., Zhang K., Ma Y., Ouyang H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: experimental and theoretical analyses. *Composites. Part B: Engineering*. 2020;188:107894.
19. Zou R. et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. *Composites. Part B: Engineering*. 2016;99:506-513.
20. Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho M.A. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: a comparative analysis, materials. *J Manuf Mater Process*. 2018;11:64.
21. Petersmann S., Spoerk M., Van De Steene W., Üçal M., Wiener J., Pinter G., Arbeiter F. Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2020;104:103611.
22. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen T., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Compos B Eng*. 2018;143:172-196.
23. Murr L.E. Frontiers of 3D printing/additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication. *Journal of Materials Science & Technology*. 2016;32(10):987-995.
24. Kafara M., Kemnitzer J., Westermann H.H., Steinhilper R. Influence of binder quantity on dimensional accuracy and resilience in 3D-printing. *Procedia Manufacturing*. 2018;21:638-646.
25. Hu Z., Chen F., Xu J., Nian Q., Line D., Chen C., Zhu X., Chen Y., Zhang M. 3D printing graphene-aluminum nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;746:269-276.
26. Melenka G.W. et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Composite Structures*. 2016;153:866-875.

Поступила 25.10.2022; принята к публикации 15.02.2023; опубликована 27.03.2023  
Submitted 25/10/2022; revised 15/02/2023; published 27/03/2023

**Ерошенко Владислав Олегович** – аспирант кафедры машиностроительных технологий, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия. Email: vladrusty00@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3334-7241. SPIN РИНЦ 2029-5428. AuthorID 1167361.

**Малькова Марианна Юрьевна** – доктор технических наук, профессор, кафедра машиностроительных технологий, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия. Email: malkova-myu@rudn.ru. ORCID 0000-0002-6939-1658. SPIN РИНЦ 2680-1505. AuthorID 613682. Scopus AuthorID 57214744555.

**Задиранов Александр Никитич** – доктор технических наук, профессор, кафедра процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Москва, Россия. Email: zadiranov@mail.ru. ORCID 0000-0001-7787-8290. SPIN РИНЦ 2873-6465. AuthorID 323875. Scopus Author ID: 57214856655.

**Мещеряков Алексей Викторович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра процессов горения и экологической безопасности, учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Москва, Россия.  
Email: malviktpp@gmail.com. ORCID 0000-0001-6620-8590. SPIN РИНЦ 1044-5995. AuthorID 656289.

**Vladislav O. Eroshenko** – postgraduate student, Department of Mechanical Engineering Technologies, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia. Email: vladrusty00@yandex.ru.  
ORCID 0000-0002-3334-7241. eLIBRARI SPIN code 2029-5428. AuthorID 1167361.

**Marianna Yu. Malkova** – DrSc (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia. Email: malkova-myu@rudn.ru.  
ORCID 0000-0002-6939-1658. eLIBRARI SPIN code 2680-1505. AuthorID 613682.  
Scopus Author ID 57214744555.

**Aleksandr N. Zadiranov** – DrSc (Eng.), Professor, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Fighting Service Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia. Email: zadiranov@mail.ru.  
ORCID 0000-0001-7787-8290. eLIBRARI SPIN code 2873-6465. AuthorID 323875.  
Scopus Author ID 57214856655.

**Aleksey V. Meshcheryakov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Fighting Service Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia.  
Email: malviktpp@gmail.com. ORCID 0000-0001-6620-8590. eLIBRARI SPIN code 1044-5995.  
AuthorID 656289.