

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Самарский государственный
аэрокосмический университет имени
академика С. П. Королёва



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Результаты выполнения ПНИЭР по теме:
«Разработка комплекса технологий ремонта и
восстановления функциональных характеристик
ответственных деталей газотурбинных двигателей и
энергетических установок»**

Идентификатор ПНИЭР RFMEFI57815X0131

Научный руководитель: Мурзин С.П.

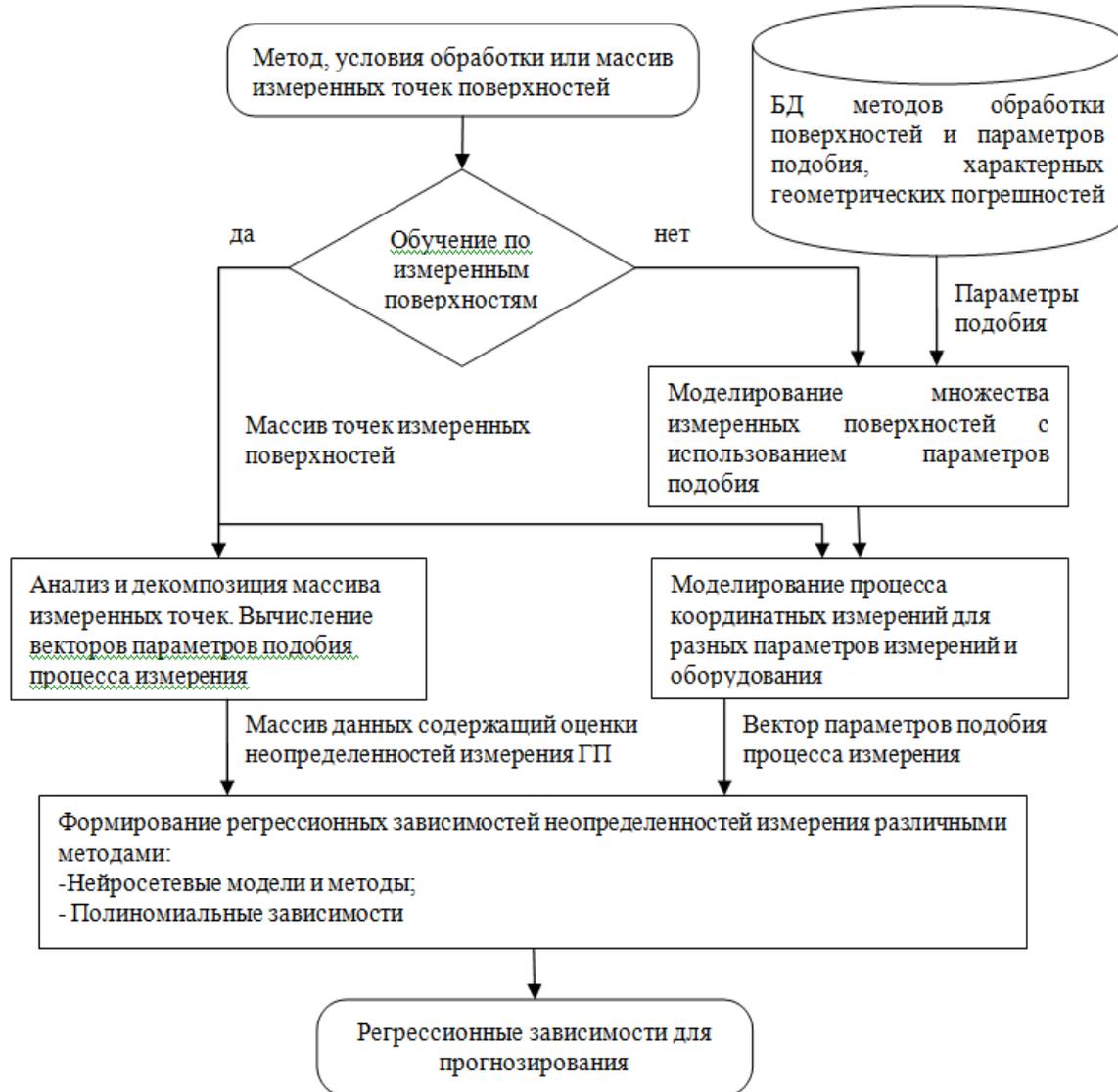
Ответственный исполнитель: Болотов М.А.

Самара, 2016 г.

Цель работ

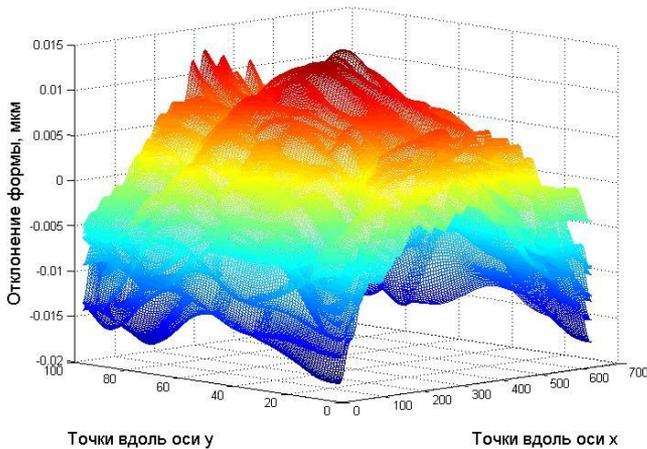
- Целью работ является разработка комплекса технологических решений ремонта и восстановления функциональных характеристик ответственных деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок с использованием методов лазерной обработки, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств деталей.

Разработка методики оценки неопределенностей координатных измерений

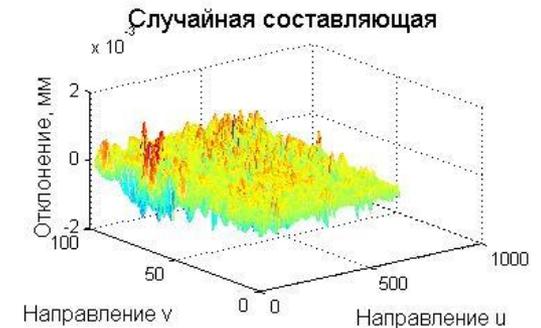
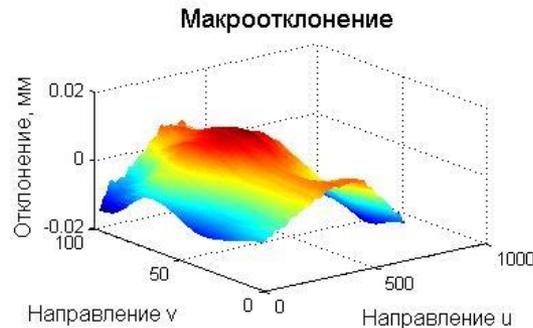
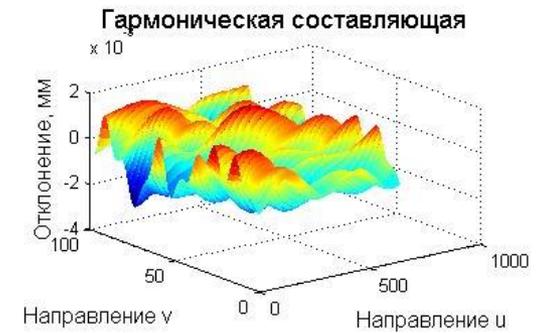
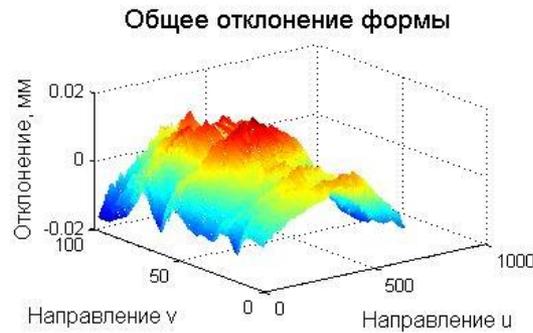


Разработка методики оценки неопределенностей координатных измерений

Измеренные поверхности



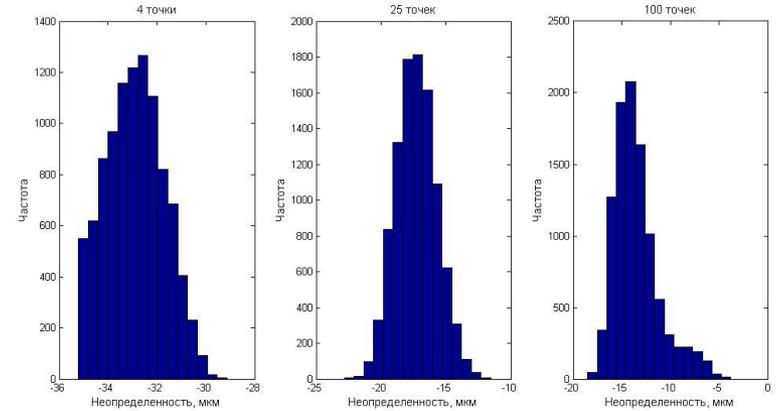
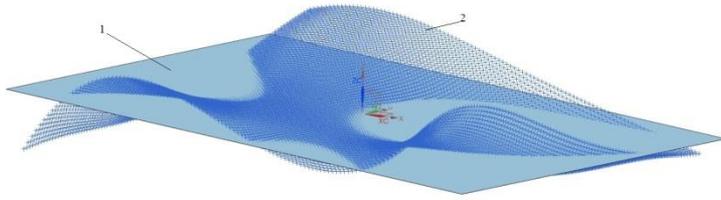
Анализ отклонений



Анализ и декомпозиция массива измеренных точек на составляющие погрешности. Вычисление векторов параметров подобия процесса измерения.

Разработка методики оценки неопределенностей координатных измерений

Моделирование поверхностей и процесса измерения



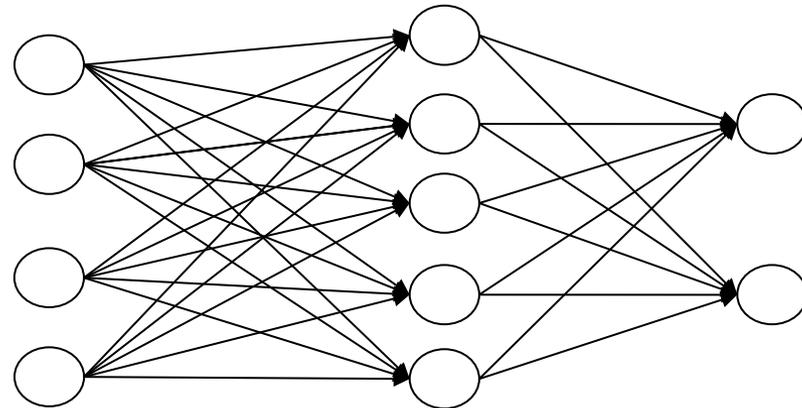
Создание регрессионных моделей

$$\Delta = f(\Delta_{\text{изм}}, f_e, \lambda, N),$$

где f_e – отклонение формы;

λ - вид отклонения формы поверхности;

N - количество точек контроля.



Входные
параметры

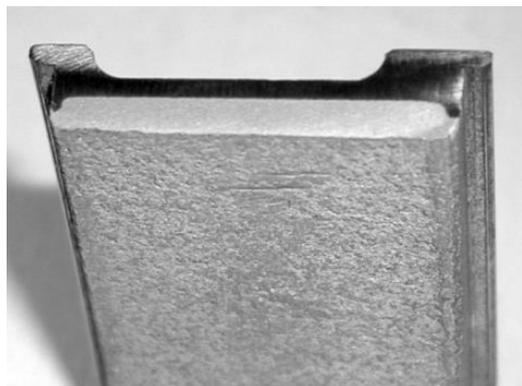
Веса

Радиально-
базисный слой
нейронов

Линейные
веса

Выходной
линейный
слой

Исследования формирования лазерным воздействием структур материалов деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок с повышением эксплуатационных свойств



Структура срабатываемого уплотнительного покрытия АНБ, нанесённого на подслоя из терморезирующего сплава НА67 после лазерной обработки



Образцы после предварительных испытаний на совместную деформацию покрытия и основы, изготовленные: по традиционной технологии; с использованием комбинированной плазменно-лазерной обработки; газотермическим напылением с применением лазерной обработки подслоя

Разработка математической модели оптимизации параметров выполнения измерений

Определение параметров измерения:

$$\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_i, \dots, \Pi_n\}$$

Обеспечивающих минимум критерия оптимальности. Например, трудоёмкости:

$$F_{\Pi} = \sum_{i=1}^n d_i \rightarrow \min$$

d_i – трудоёмкость или стоимость выполнения измерений i -го элемента: $d_i = f_i(\Pi)$.

Накладываемые ограничения:

1. Ограничения неопределённости измерения j -го геометрического параметра:

$$\Delta_j(\Pi) \leq [\Delta]_j$$

где $[\Delta]_j$ – допустимый уровень неопределённостей измерения j -го геометрического параметра.

2. Условия равномерного распределения точек по измеряемым поверхностям:

$$\rho(\Pi_1) \approx \rho(\Pi_2) \approx \dots \approx \rho(\Pi_n) \approx C$$

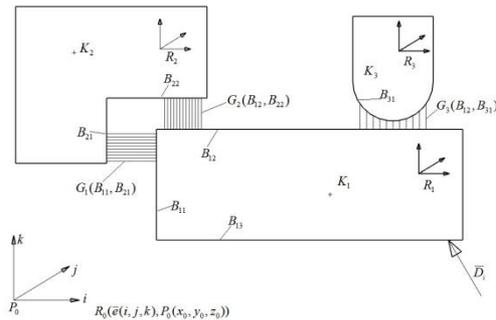
где C - средняя величина плотности;

$\rho(\Pi_i)$ - плотность i -й точки.

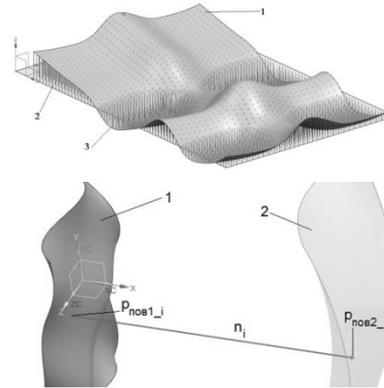
Разработка математической модели оценки параметров единичного сопряжения поверхностей пары собираемых деталей

Метод и модель сборки в системе MATLAB (без учётом деформаций)

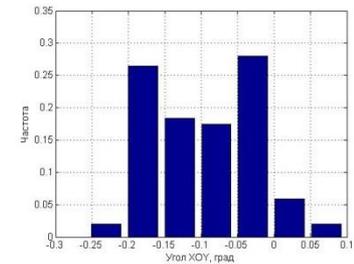
Метод решения



Модели сопряжения

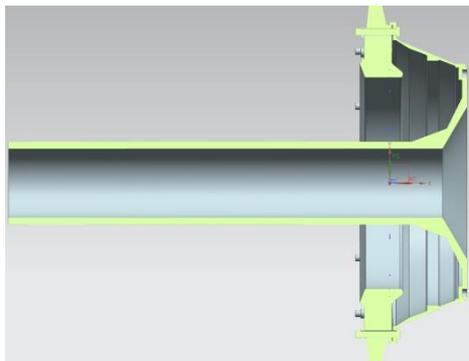


Анализ

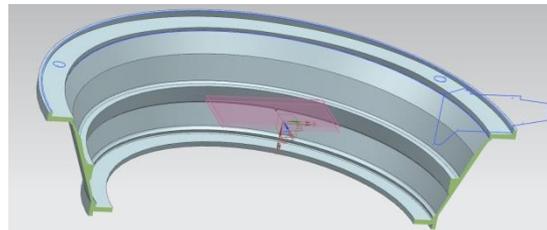


Методика и модель сборки в системе Ansys (с учётом деформаций)

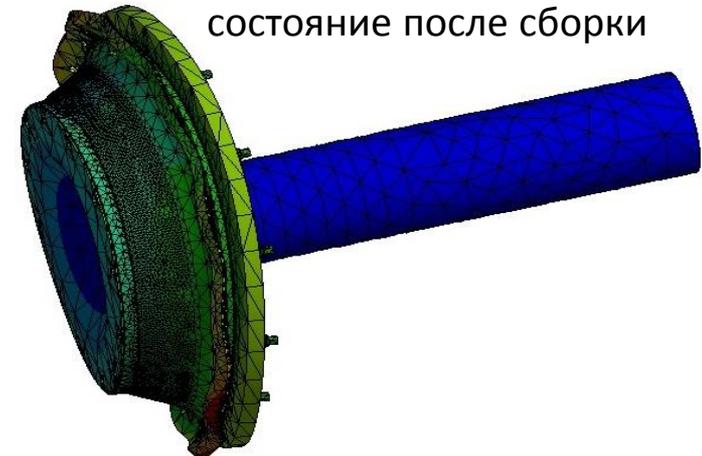
Схема сборки



Действительные модели после измерений

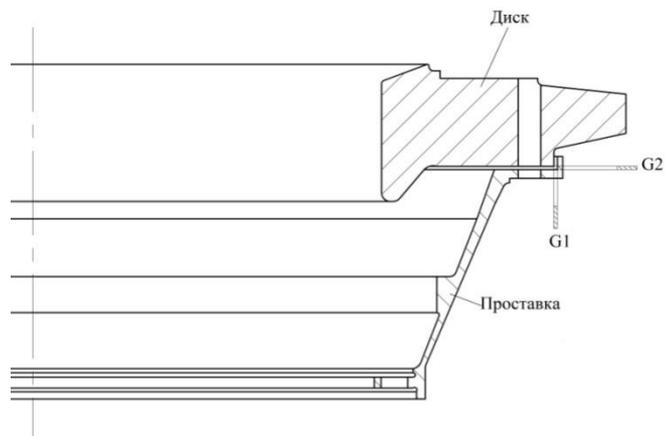


Прогнозируемое состояние после сборки

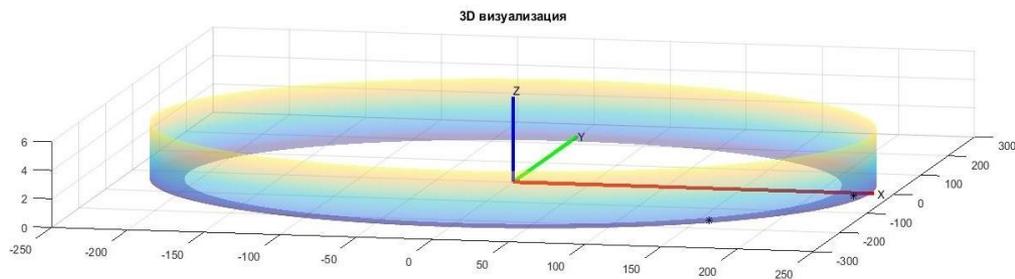
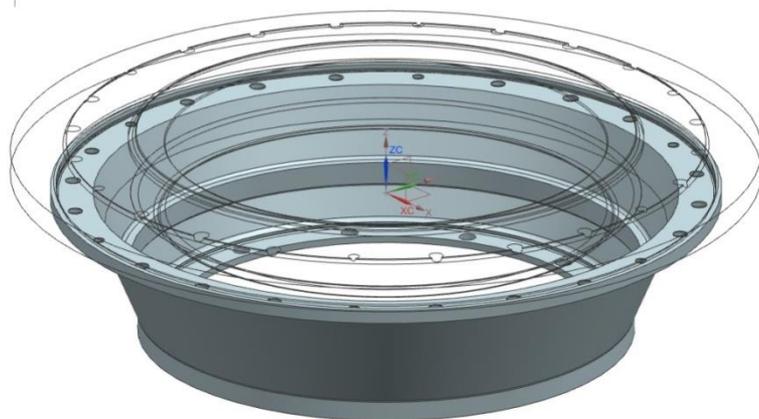
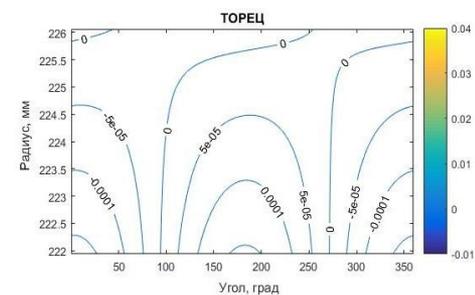
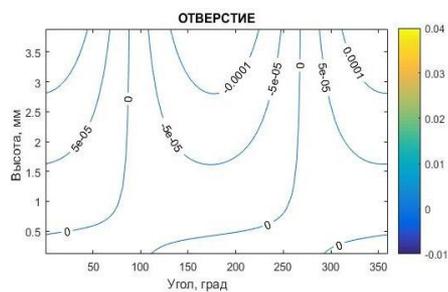


Разработка методики оценки вероятностных пространственных параметров сопряжений деталей

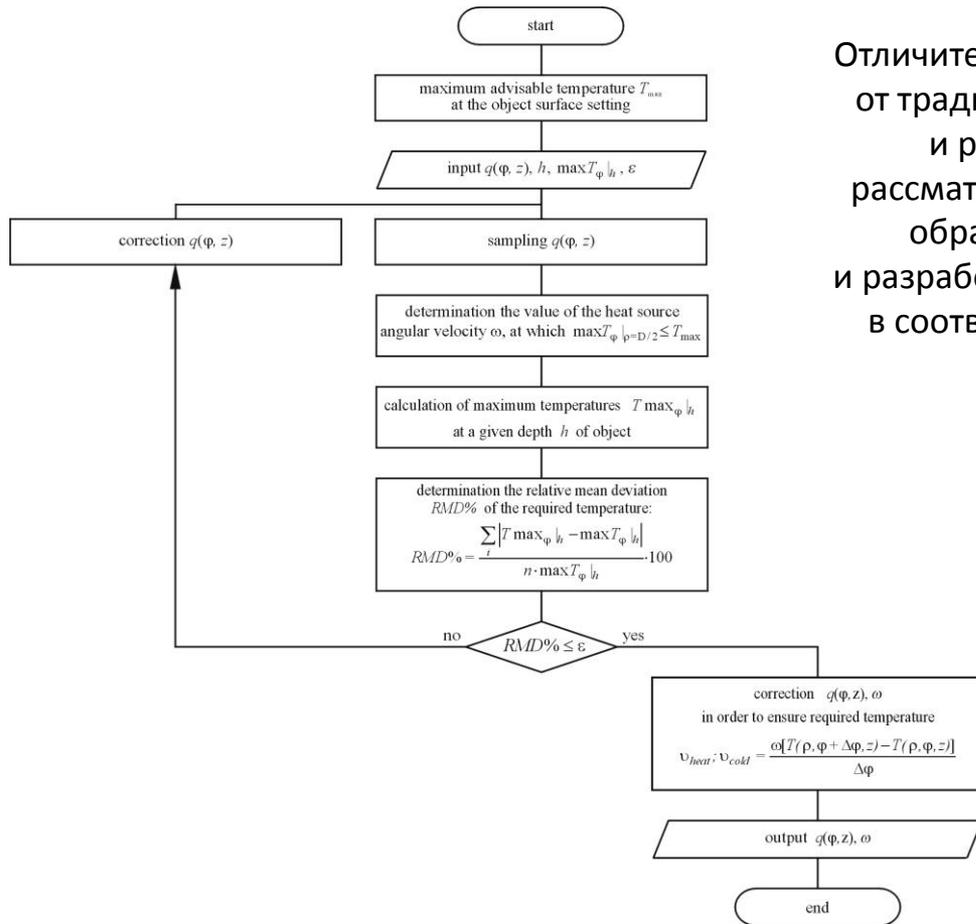
Модель сопряжения диска и проставки



Визуализация решения задачи сопряжения в системе MATLAB

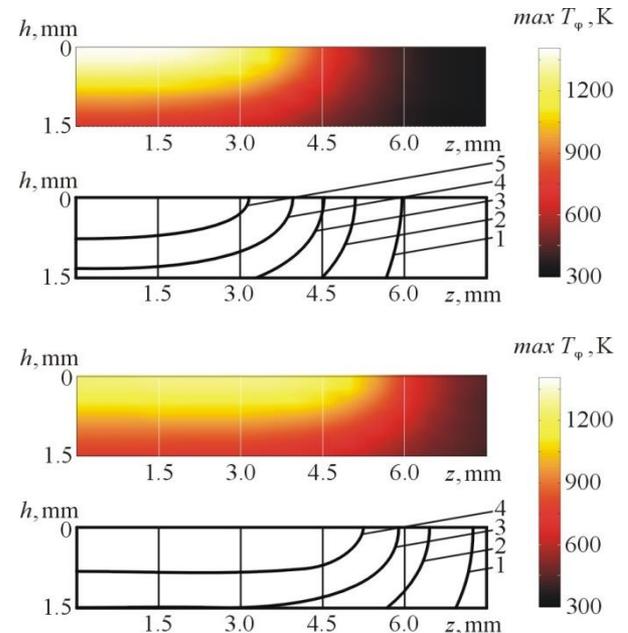


Разработка методики регулирования распределения интенсивности лазерного излучения в зоне термического влияния на поверхности обрабатываемых деталей, применимой для определения параметров лазерной обработки деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок

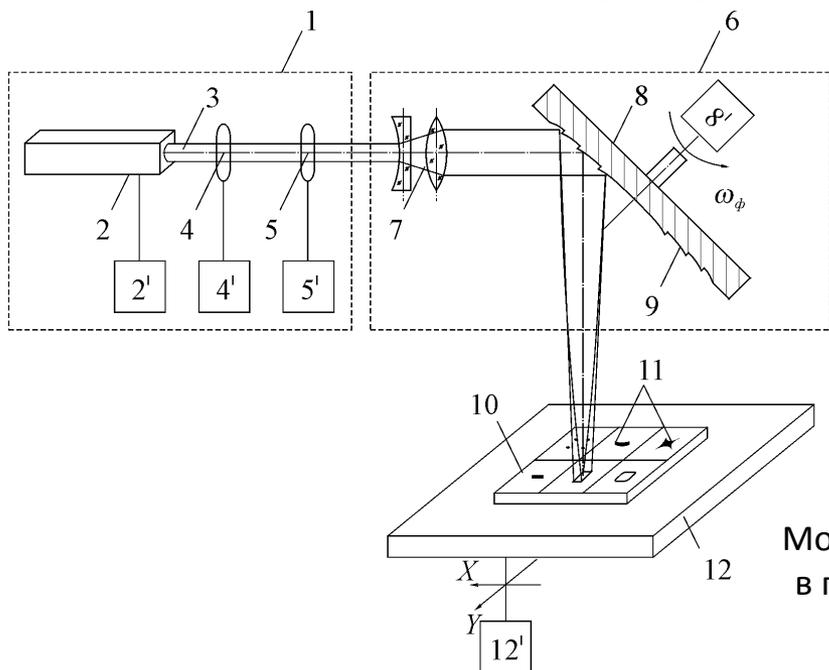


Блок-схема регулирования распределения интенсивности лазерного излучения в зоне термического влияния на поверхности обрабатываемых деталей

Отличительными особенностями разрабатываемого подхода от традиционного являются то, что форма лазерного пятна и распределение плотности мощности излучения рассматриваются в качестве основных параметров режима обработки, выбор параметров лазерного источника и разработка технологических оптических систем проводится в соответствии с результатами решения обратной задачи теплопроводности

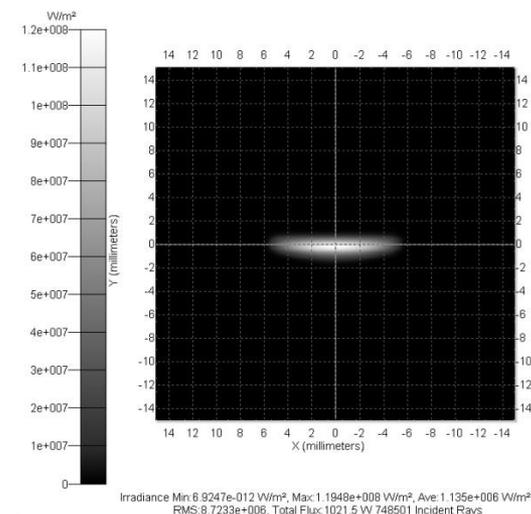
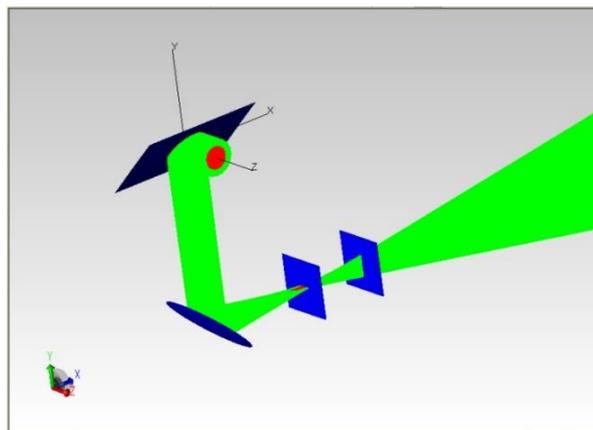
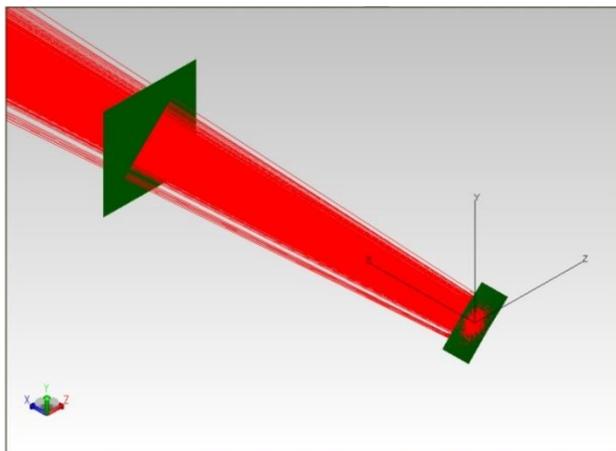


Теоретические исследования распределения интенсивности лазерного излучения в зоне термического влияния при использовании устройств формирования лазерных потоков



Устройство формирования лазерных потоков:
 1 – лазерная технологическая установка; 2 – лазер;
 3 – излучение; 4, 5 – измерители мощности и пространственного распределения интенсивности излучения; 6 – оптическая система; 7 – телескопическая система; 8 – дифракционный оптический элемент; 9 – рабочая поверхность дифракционного оптического элемента; 10 – обрабатываемый объект; 11 – зона обработки; 12 – устройство перемещения

Моделирование оптической системы в программном комплексе TracePro



Разработка математической модели тепловых процессов в
конструкционных материалах при воздействии движущихся
распределенных поверхностных тепловых источников

Температура во всех узлах расчетной области в моменты времени, следующие с интервалом Δt_m :

$$T_{i,j,\kappa}^{m+1} = \frac{\sum_{g=1}^{S^*} \left[a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1, j, \kappa \\ i, j-1, \kappa \\ i, j, \kappa-1 \end{smallmatrix} \right\}} T_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1, j, \kappa \\ i, j-1, \kappa \\ i, j, \kappa-1 \end{smallmatrix} \right\}}^m + a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1, j, \kappa \\ i, j+1, \kappa \\ i, j, \kappa+1 \end{smallmatrix} \right\}} T_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1, j, \kappa \\ i, j+1, \kappa \\ i, j, \kappa+1 \end{smallmatrix} \right\}}^m \right] + \Delta V_{i,j,\kappa} \left(S_{C_{i,j,\kappa}} + T_{i,j,\kappa}^m c_V (T_{i,j,\kappa}^m) / \Delta t_m \right)}{\sum_{g=1}^{S^*} \left[a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1, j, \kappa \\ i, j-1, \kappa \\ i, j, \kappa-1 \end{smallmatrix} \right\}} + a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1, j, \kappa \\ i, j+1, \kappa \\ i, j, \kappa+1 \end{smallmatrix} \right\}} \right] + \Delta V_{i,j,\kappa} c_V (T_{i,j,\kappa}^m) / \Delta t_m},$$

где $\left\{ \begin{smallmatrix} i \\ j \\ \kappa \end{smallmatrix} \right\} = 1, 2, \dots, \left\{ \begin{smallmatrix} I \\ J \\ K \end{smallmatrix} \right\}$; $\left\{ \begin{smallmatrix} I \\ J \\ K \end{smallmatrix} \right\}$ – размерность индексного пространственного массива;

$T_{i,j,\kappa}$ – температура, определяемая в узлах пространственной сетки; S^* – размер тела; g – номер орта; m и $m+1$ – индексы двух последовательных моментов времени, промежуток между которыми равен Δt_m ; $S_{C_{i,j,\kappa}}$ – внешний (воздействующий) энергетический источник; $\Delta V_{i,j,\kappa}$ – контрольный объем;

$a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1, j, \kappa \\ i, j-1, \kappa \\ i, j, \kappa-1 \end{smallmatrix} \right\}}$, $a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1, j, \kappa \\ i, j+1, \kappa \\ i, j, \kappa+1 \end{smallmatrix} \right\}}$ – проводимости между узловой точкой и соответствующими ей точками семиточечного крестообразного шаблона,

которые при численном решении дифференциального уравнения теплопроводности определяются уравнениями:

$$a_{i-1,j,\kappa} = k_{i-1,j,\kappa} \rho_{i-1,j,\kappa} \Delta \varphi \Delta z / (\delta \rho)_{i-1,j,\kappa}$$

$$a_{i+1,j,\kappa} = k_{i+1,j,\kappa} \rho_{i+1,j,\kappa} \Delta \varphi \Delta z / (\delta \rho)_{i+1,j,\kappa}$$

$$a_{i,j-1,\kappa} = k_{i,j-1,\kappa} \Delta \rho \Delta z / \rho_{i,j-1,\kappa} (\delta \varphi)_{i,j-1,\kappa}$$

$$a_{i,j+1,\kappa} = k_{i,j+1,\kappa} \Delta \rho \Delta z / \rho_{i,j+1,\kappa} (\delta \varphi)_{i,j+1,\kappa}$$

$$a_{i,j,\kappa-1} = k_{i,j,\kappa-1} \rho_{i,j,\kappa-1} \Delta \varphi \Delta \rho / (\delta z)_{i,j,\kappa-1}$$

$$a_{i,j,\kappa+1} = k_{i,j,\kappa+1} \rho_{i,j,\kappa+1} \Delta \varphi \Delta \rho / (\delta z)_{i,j,\kappa+1}$$

Разработка математической модели тепловых процессов в конструкционных материалах при воздействии движущихся распределенных поверхностных тепловых источников

Температура во всех узлах расчетной области в моменты времени, следующие с интервалом Δt_m :

$$T_{i,j,k}^{m+1} = \frac{\sum_{g=1}^{S^*} \left[a_{\begin{Bmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{Bmatrix}} T_{\begin{Bmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{Bmatrix}}^m + a_{\begin{Bmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{Bmatrix}} T_{\begin{Bmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{Bmatrix}}^m \right] + \Delta V_{i,j,k} \left(S_{C_{i,j,k}} + T_{i,j,k}^m c_V (T_{i,j,k}^m) / \Delta t_m \right)}{\sum_{g=1}^{S^*} \left[a_{\begin{Bmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{Bmatrix}} + a_{\begin{Bmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{Bmatrix}} \right] + \Delta V_{i,j,k} c_V (T_{i,j,k}^m) / \Delta t_m},$$

где $\begin{Bmatrix} i \\ j \\ k \end{Bmatrix} = 1, 2, \dots, \begin{Bmatrix} I \\ J \\ K \end{Bmatrix}$; $\begin{Bmatrix} I \\ J \\ K \end{Bmatrix}$ – размерность индексного пространственного массива;

$T_{i,j,k}$ – температура, определяемая в узлах пространственной сетки; S^* – размер тела; g – номер орта; m и $m+1$ – индексы двух последовательных моментов времени, промежуток между которыми равен Δt_m ; $S_{C_{i,j,k}}$ – внешний (воздействующий) энергетический источник; $\Delta V_{i,j,k}$ – контрольный объем;

$a_{\begin{Bmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{Bmatrix}}$, $a_{\begin{Bmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{Bmatrix}}$ – проводимости между узловой точкой и соответствующими ей точками семиточечного крестообразного шаблона,

которые при численном решении дифференциального уравнения теплопроводности определяются уравнениями:

$$a_{i-1,j,k} = k_{i-1,j,k} \rho_{i-1,j,k} \Delta \varphi \Delta z / (\delta \rho)_{i-1,j,k}$$

$$a_{i+1,j,k} = k_{i+1,j,k} \rho_{i+1,j,k} \Delta \varphi \Delta z / (\delta \rho)_{i+1,j,k}$$

$$a_{i,j-1,k} = k_{i,j-1,k} \Delta \rho \Delta z / \rho_{i,j-1,k} (\delta \varphi)_{i,j-1,k}$$

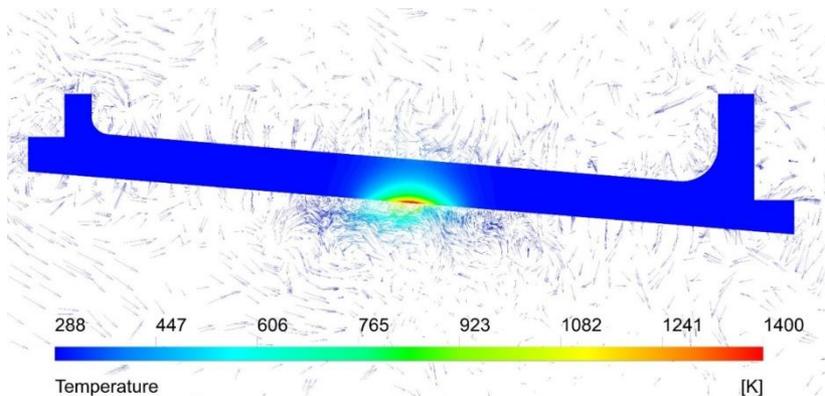
$$a_{i,j+1,k} = k_{i,j+1,k} \Delta \rho \Delta z / \rho_{i,j+1,k} (\delta \varphi)_{i,j+1,k}$$

$$a_{i,j,k-1} = k_{i,j,k-1} \rho_{i,j,k-1} \Delta \varphi \Delta \rho / (\delta z)_{i,j,k-1}$$

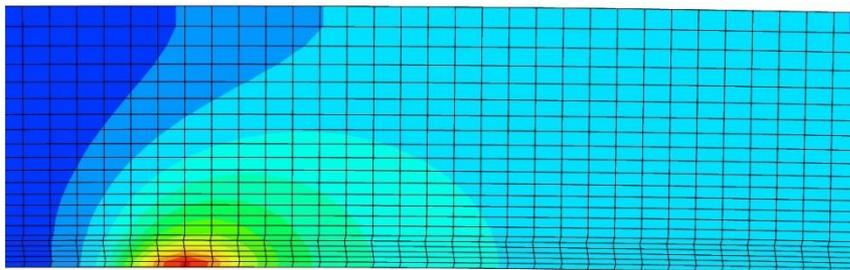
$$a_{i,j,k+1} = k_{i,j,k+1} \rho_{i,j,k+1} \Delta \varphi \Delta \rho / (\delta z)_{i,j,k+1}$$

Математическое моделирование тепловых процессов в конструкционных материалах при лазерном воздействии и определены закономерности формирования температурных полей

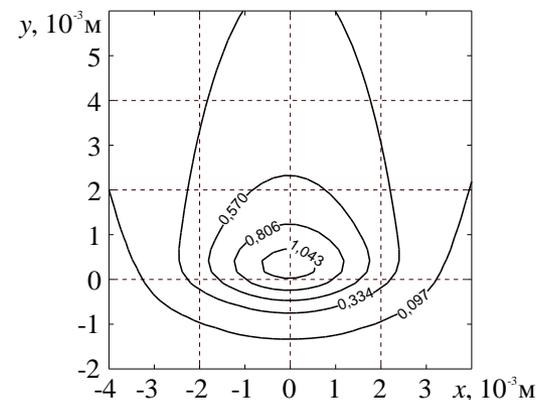
Для определения распределения температур в основе и подслое при лазерной обработке использовалась программа вычислительной газодинамики ANSYS Computational Fluid Dynamics версии 15.0. Расчёт проводился на суперкомпьютере «Сергей Королёв», построенном на базе линейки оборудования IBM BladeCenter с использованием блейд-серверов и обеспечивающим пиковую производительность 30 ТФлопс.



Распределение температуры основы с подслоем и векторы скорости воздуха в плоскости лазерной обработки. Мощность лазерного излучения 500 Вт, скорость обработки 0,5 см/с.



0 1.000 2.000 (mm)
0.500 1.500



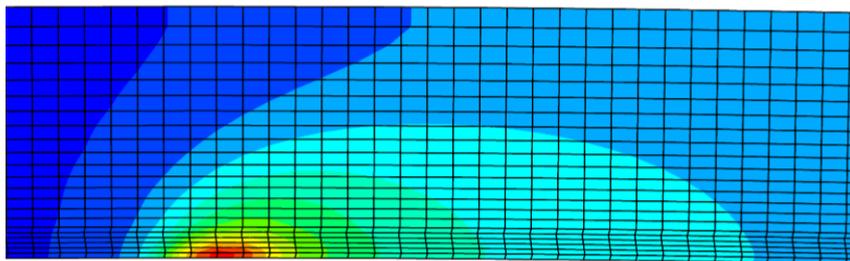
Распределение безразмерной температуры

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0}$$

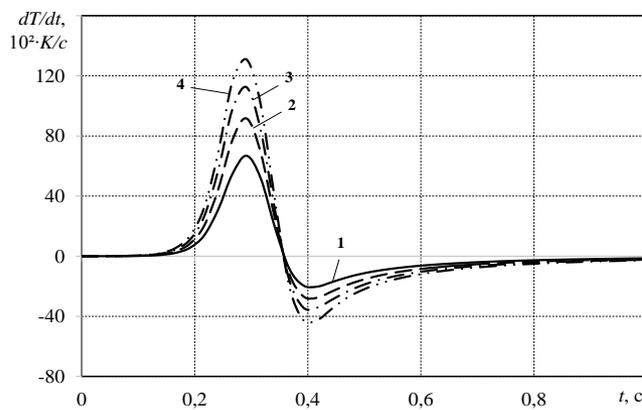
на границе между основой и подслоем, где T – температура в рассматриваемой области; T_0 – температура окружающей среды ($T_0=288\text{K}$); T_1 – температура, необходимая для синтеза Ni и Al ($T_1=923\text{K}$). Мощность лазерного излучения 500 Вт, скорость обработки 0,5 см/с.

Расчет тепловых процессов в конструкционных материалах при лазерном воздействии и определены закономерности формирования температурных полей

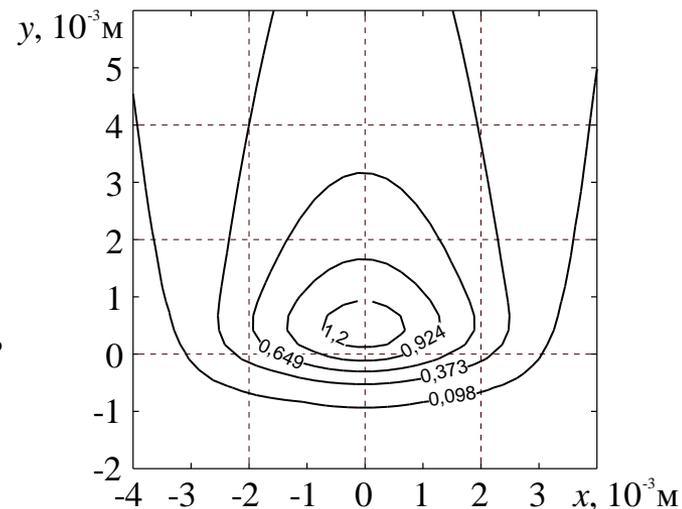
Тепловые процессы термической обработки с учетом оксидирования поверхности подслоя



Температурное поле в плоскости лазерной обработки. Мощность лазерного излучения 150 Вт, скорость обработки 1 см/с.



Скорости нагрева/охлаждения материала в центре зоны термического влияния на границе подслоя и основы для мощности лазерного излучения: 1 – $Q=100$ Вт; 2 – $Q=150$ Вт; 3 – $Q=200$ Вт; 4 – $Q=250$ Вт.



Распределение безразмерной температуры на границе между основой и покрытием. Мощность лазерного излучения 150 Вт, скорость обработки 1 см/с.

Исследование достигаемой геометрической точности деталей и узлов газотурбинного двигателя при выполнении ремонтных и сборочных работ стандартными методами

Проведены исследования достигаемой геометрической точности как отдельных деталей, так и сборочных единиц ГТД и ЭУ. Исследование производилось на деталях статора и ротора стандартными методами.

Спасибо за внимание!