

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

(МАИ)

На правах рукописи



**ЕЖОВ АЛЕКСЕЙ ДМИТРИЕВИЧ**

**КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА  
ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 1.3.14.

«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

**Диссертация**

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:  
д.т.н., профессор,  
Молчанов А.М.

Москва 2025 г.

## Содержание

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                    | 7  |
| ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНЫХ<br>УЗЛАХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК .....                                              | 22 |
| 1.1. Газотурбинные установки.....                                                                                                | 22 |
| 1.1.2 Контактные узлы перспективных ГТД . Крепление лопаток турбин.....                                                          | 23 |
| 1.1.3 Контактные узлы перспективных ГТД . Сопло. ....                                                                            | 28 |
| 1.2. Теплообменные аппараты .....                                                                                                | 29 |
| 1.3. Атомная энергетика.....                                                                                                     | 30 |
| 1.4. Системы хранения и накопления энергии .....                                                                                 | 31 |
| 1.5. Ракетные двигатели .....                                                                                                    | 32 |
| 1.5.1. Применение композиционных материалов при проектировании камер<br>сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги ..... | 32 |
| 1.5.2. Узлы соединений в конструкциях жидкостных ракетных двигателей<br>малой тяги .....                                         | 34 |
| 1.6. Космические аппараты.....                                                                                                   | 37 |
| 1.7. Тепловая защита летательных аппаратов.....                                                                                  | 38 |
| 1.8. Микроэлектроника.....                                                                                                       | 40 |
| 1.9. Наземный транспорт.....                                                                                                     | 42 |
| Выводы по Главе 1 .....                                                                                                          | 43 |
| ГЛАВА 2. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ<br>КОНТАКТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ.....                                       | 45 |
| 2.1. Существующие подходы к определению значения контактного термического<br>сопротивления / проводимости.....                   | 45 |
| 2.2. Существующие аналитические зависимости для расчета контактного<br>термического сопротивления / проводимости .....           | 56 |
| Выводы по Главе 2 .....                                                                                                          | 72 |
| ГЛАВА 3. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОРЕЛЬЕФА<br>КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....                                                  | 75 |

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Существующие подходы к моделированию микрорельефа контактирующих поверхностей.....                                                                       | 75  |
| 3.2. Основные параметры микрорельефа .....                                                                                                                    | 80  |
| 3.3. Методы получения профилограмм поверхностей.....                                                                                                          | 84  |
| 3.4. Формирование облика макета цифрового двойника поверхности на основе облака точек .....                                                                   | 90  |
| 3.4.1. Метод вершин.....                                                                                                                                      | 95  |
| 3.4.2. Метод локальных экстремумов .....                                                                                                                      | 102 |
| 3.5. Моделирование трехмерной топографии на основе теории фракталов. ....                                                                                     | 109 |
| 3.5.1. Построение фрактальной геометрии на основе среднеарифметического отклонения профиля $R_a$ .....                                                        | 109 |
| 3.5.2. Построение фрактальной геометрии на основе параметра Хёрста и метода R/S анализа.....                                                                  | 129 |
| Выводы по Главе 3 .....                                                                                                                                       | 138 |
| ГЛАВА 4. МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОРЕЛЬЕФОВ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ. ....                                                                 | 140 |
| 4.1. Модель контактного взаимодействия на базе фрактальной теории .....                                                                                       | 140 |
| 4.1.1 Модель эквивалентной микрогеометрии.....                                                                                                                | 140 |
| 4.1.2. Анализ взаимодействия двух шероховатых поверхностей на основании схемы взаимодействия плоскости и эквивалентной поверхности .....                      | 143 |
| 4.2. Численное моделирование контактного взаимодействия на базе макета цифрового двойника микрорельефа поверхностей методом конечно-элементного анализа. .... | 146 |
| Выводы по Главе 4 .....                                                                                                                                       | 157 |
| ГЛАВА 5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....                                                                             | 159 |
| 5.1. Общая схема протекания тепловых процессов в соединениях .....                                                                                            | 159 |
| 5.2. Модель контактного теплообмена на базе фрактальной теории .....                                                                                          | 162 |

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. Численное моделирование теплового взаимодействия на базе макета цифрового двойника микрорельефа поверхностей методом конечно-элементного анализа ..... | 165 |
| Выводы по Главе 5 .....                                                                                                                                     | 169 |
| ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КОНТАКТНУЮ ТЕРМИЧЕСКУЮ ПРОВОДИМОСТЬ .....                                                                     | 171 |
| 6.1 Влияние геометрии микрорельефа на контактный теплообмен .....                                                                                           | 173 |
| 6.2 Влияние микрогеометрии на контактный теплообмен .....                                                                                                   | 174 |
| 6.3 Влияние давления на границе раздела фаз на контактный теплообмен .....                                                                                  | 179 |
| 6.4 Влияние свойств материала на контактное тепловое сопротивление .....                                                                                    | 180 |
| 6.5 Влияние температуры на контактное тепловое сопротивление .....                                                                                          | 182 |
| 6.6 Влияние лучистого теплообмена между соприкасающимися поверхностями на контактный теплообмен .....                                                       | 182 |
| 6.7 Влияние модуля упругости материалов на контактный теплообмен .....                                                                                      | 190 |
| 6.8 Влияние межконтактной среды. ....                                                                                                                       | 192 |
| 6.9. Влияние покрытий на контактный теплообмен .....                                                                                                        | 217 |
| 6.10. Влияние циклической нагрузки на контактный теплообмен .....                                                                                           | 237 |
| 6.11. Влияние низких температур контактирования .....                                                                                                       | 249 |
| 6.12. Влияние анизотропии свойств материала на контактный теплообмен .....                                                                                  | 254 |
| Выводы по Главе 6 .....                                                                                                                                     | 287 |
| ГЛАВА 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ .....                                                                        | 289 |
| 7.1. Анализ известных конструкций экспериментальных установок .....                                                                                         | 289 |
| 7.2. Экспериментальная установка для исследования контактного теплообмена в вакууме и газовых средах .....                                                  | 292 |
| 7.2.1 Система измерения .....                                                                                                                               | 294 |
| 7.3. Экспериментальная установка для исследования контактного теплообмена в атмосферных условиях .....                                                      | 299 |
| 7.4. Методика проведения эксперимента .....                                                                                                                 | 303 |
| 7.4.1 Обоснование режимных параметров .....                                                                                                                 | 304 |



|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.4.2 Обработка результатов эксперимента.....                                                                                                  | 305 |
| 7.4.3 Методика определения контактного термического сопротивления по результатам нестационарного нагрева.....                                  | 307 |
| 7.4.4. Оценка погрешности планируемых результатов.....                                                                                         | 308 |
| Выводы по Главе 7 .....                                                                                                                        | 310 |
| ГЛАВА 8. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РАССМОТРЕНИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА.....                                      | 312 |
| 8.1. Введение в нейронные сети .....                                                                                                           | 312 |
| 8.2. Решение обратной задачи теплопроводности с помощью нейронных сетей                                                                        | 313 |
| 8.3. Решение задачи контактного теплообмена с помощью нейронных сетей.....                                                                     | 323 |
| Выводы по Главе 8 .....                                                                                                                        | 328 |
| ГЛАВА 9. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ РЕШЕНИЙ .....                                                                                         | 329 |
| 9.1. Расчет тепловых процессов в конструкциях жидкостных ракетных двигателей малой тяги .....                                                  | 329 |
| 9.1.1. Постановка задачи исследования .....                                                                                                    | 329 |
| 9.1.2. Разработка расчетной модели .....                                                                                                       | 330 |
| 9.1.3. Установка граничных условий и обоснование параметров.....                                                                               | 332 |
| 9.1.4. Решение термо-прочностной задачи .....                                                                                                  | 334 |
| 9.1.5. Рекомендация по совершенствованию контактного узла.....                                                                                 | 341 |
| 9.1.6. Расчет усовершенствованной геометрии.....                                                                                               | 343 |
| 9.1.7. Расчет контактного термического сопротивления в областях контакта деталей в конструкциях жидкостных ракетных двигателей малой тяги..... | 353 |
| 9.1.8. Расчет теплонапряженного состояния конструкции малой камеры сгорания с учетом значения КТС между соприкасающимися деталями.....         | 366 |
| 9.2. Расчет тепловых процессов в конструкциях лопатка-диск газотурбинного двигателя .....                                                      | 372 |
| 9.2.1. Постановка задачи исследования .....                                                                                                    | 372 |
| 9.2.2. Разработка расчетной модели лопатки типа «ласточкин хвост» .....                                                                        | 373 |
| 9.2.3. Создание макета цифрового двойника контактирующих поверхностей ....                                                                     | 383 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.2.4. Моделирование укладки волокон в конструкции узла контакта лопатка-диск газотурбинного двигателя .....     | 386 |
| 9.2.5. Численное моделирование механического контакта лопатка-диск на микроуровне.....                           | 390 |
| 9.2.6. Численное моделирование теплового контакта лопатка-диск на микроуровне.....                               | 398 |
| 9.2.7. Расчет теплонапряженного состояния замкового соединения керамических лопаток типа «ласточкин хвост» ..... | 408 |
| Выводы по Главе 9 .....                                                                                          | 415 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                 | 417 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ .....                                          | 420 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КТС .....                                                | 438 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....                                                                    | 443 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                           | 446 |

## Введение

Одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на эффективность теплообмена в узлах и элементах теплонагруженных механизмов, является контактная термическая проводимость (КТП) или обратная ей величина - контактное термическое сопротивление (КТС), которое возникает на границах соприкосновения твердых тел, имеющих микронеровности на поверхностях контакта (Рис.1). Учет этого фактора играет важную роль в обеспечении штатного функционирования энергоемких объектов в таких отраслях, как аэрокосмическая промышленность, ядерная энергетика, машиностроение, электротехника, а также в различных областях физики и материаловедения [1-70].

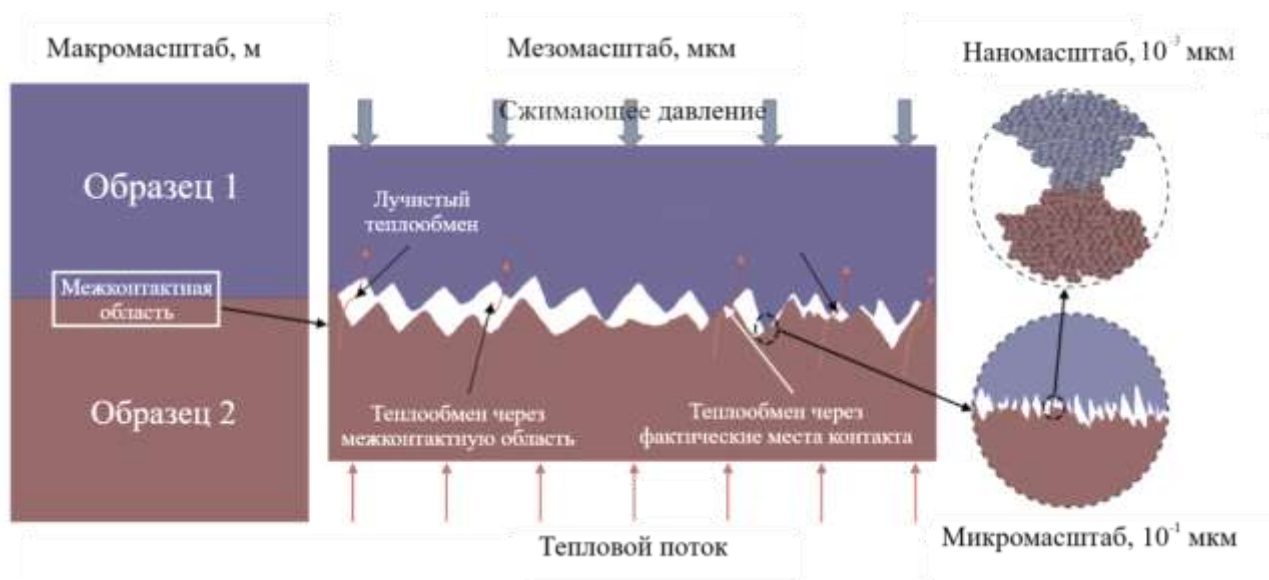


Рис.1. Механизм образования КТС/КТП в зависимости от уровня моделирования.

На основе анализа данных теплообмена в контактных соединениях теплонагруженных объектов сформулирована задача изучения влияния ряда определяющих параметров на теплопередачу через контактные поверхности «твёрдое тело – твёрдое тело». К таким параметрам относятся: сжимающее давление на границе контакта, шероховатость контактирующих поверхностей, температура в зоне контакта, физические свойства контактирующих материалов, а также величина и направление теплового потока. Перечисленные факторы оказывают существенное влияние на способность системы эффективно передавать тепло между компонентами, что непосредственно сказывается на общей тепловой нагрузке и стабильности работы оборудования.

Результаты исследований в этой области имеют широкий спектр применений, начиная от охлаждения электронных компонентов до обеспечения эффективной работы различных теплообменных устройств авиационной техники, атомной энергетики и космических аппаратов. Понимание механизмов формирования КТС и управления им помогает инженерам разрабатывать более эффективные системы охлаждения и минимизировать потери энергии.

Фундаментальные работы Попова, Шлыкова, Малькова, Купера, Микича, Йовановича, Томаса и Проберта [11, 37, 38, 65–69] заложили основу для прогнозирования теплопереноса в контактных зонах. Их полуэмпирические модели, разработанные во второй половине XX века, остаются отправной точкой при анализе стационарных режимов. Однако современные технологии проектирования систем терморегулирования в аэрокосмической и атомной отраслях, микроэлектронике и химической промышленности, энергетике, да и просто в механике, выявили ограничения классических подходов.

Внедрение композитных материалов (SiC/SiC, C/C) способны снижать массу проектируемых конструкций на 40-60%, но могут создавать некоторые проблемы при термоциклировании [70], которые требуют дополнительных исследований. Экспериментальные исследования показывают, что КТС в таких соединениях может снижаться на 30-50% после 1000 циклов «нагрев-охлаждение». Это актуализирует необходимость разработки гибридных цифровых моделей, объединяющих тепло-динамическое моделирование на микроуровне, топологический анализ поверхностей современными методами и экспериментальную верификацию этих моделей.

### **Актуальность темы исследования**

Повышение энергоэффективности и ресурса современных энергоустановок — одна из приоритетных задач авиационно-космической, энергетической и транспортной отраслей. В условиях роста рабочих температур и снижения массогабаритных характеристик конструкций особую роль приобретают свойства контактных соединений, обусловленных микрогеометрией поверхностей и теплофизическими свойствами материалов. В результате совокупности этих

факторов формируется контактное термическое сопротивление, которое может приводить к локальным перегревам, теплонапряженному состоянию объектов и преждевременным отказам элементов конструкций.

Несмотря на многочисленные исследования, неопределённость в расчётах КТС остаётся чрезвычайно высокой — от 50% до 300%, что делает невозможным достоверное прогнозирование тепловых режимов на этапе проектирования конструкций. Известные аналитические зависимости справедливы лишь для узких диапазонов давлений, температур и материалов, а их применение вне исходных условий приводит к значительным погрешностям.

В этой связи, актуальность темы настоящего исследования обусловлена разработкой и апробацией универсальной, физически и математически обоснованной методологии расчёта КТС, построенной на базе экспериментально-теоретического исследования спектра физико-химических процессов с учётом реальной микрогеометрии контактирующих поверхностей, рода материалов, анизотропию их свойств, характеристики покрытий и материалов, заполняющих межконтактное пространство, все виды теплообмена в зоне контакта, а также возможное циклическое нагружение в условиях эксплуатации изделий. Разработанная и апробированная методология позволит на раннем этапе проектирования изделий обеспечить требуемые тепловые режимы теплонапряжённых элементов конструкции агрегатов и машин, а, следовательно, надёжность и долговечность их эксплуатации. Актуальность исследований подтверждается включением их в программу работ по гранту Министерства науки и высшего образования РФ №FSFF-2023-0006.

### **Степень разработанности проблемы**

Проблема контактного теплообмена исследовалась в трудах отечественных (Попов В.М., Шлыков Ю.П., Мальков В.А., Ганин Е.А., Дульнев Г.Н., Меснянкин С.Ю., Мурашов М.В.) и зарубежных (Yovanovich M.M., Fletcher L.S., Mikic B.B., Greenwood J.A., Williamson J.B.P., Bahrami M., Jackson R.L., Prasher R., Dai Y.J., Ren X.J., Gou J.J., Zhang P., Li Q.) учёных.

Однако разработанные в этих исследованиях физические и математические модели имеют ряд недостатков, например:

- основаны на упрощённых представлениях о шероховатости (гауссово распределение, сферические аспериты);
- не учитывают анизотропию теплопроводности;
- не учитывают значительный вклад лучистого теплообмена при высоких температурах и низких сжимающих давлениях;
- неприменимы к широкому спектру конструкционных материалов и комплексу условий эксплуатации изделий.

Современные подходы к изучению характеристик КТС, такие как численное моделирование и машинное обучение, позволяют повысить точность результатов расчета, но требуют их верификации на физически достоверных данных.

В качестве объекта исследования выбраны известные конструкции, содержащие многочисленные теплонапряженные неидеальные соединения.

**Цель диссертационной работы** — разработка научно-методического и инструментального обеспечения для многопараметрического моделирования, анализа и оптимизации процесса контактного теплообмена в ответственных узлах конструкций перспективных энергоустановок различных отраслей промышленности.

Для достижения цели **решены следующие задачи:**

- Проведен обзор фундаментальных работ по контактному теплообмену и выполнен теоретический анализ по проблематике контактного теплообмена в теплообменных устройствах и элементах конструкции авиационной техники, атомной энергетики, космических аппаратов, микроэлектроники и др.;
- Созданы оригинальная установка для определения КТС в парах различных материалов в атмосферных условиях и установка по определению КТС пар материалов в контролируемых средах (вакуум, инертные газы);
- Экспериментально определены геометрические характеристики типичных контактирующих поверхностей и создана база данных микротопографий профилей.

- Разработана методика построения макета цифрового двойника микрорельефа на основе данных измерения профилограмм поверхностей. Методика реализована в виде программы для ЭВМ.

- Разработана методика численно-аналитического расчета контактного термического сопротивления для представления микрорельефа контактных поверхностей с учетом пластических и упруго-пластических деформаций. Методика реализована в виде программы для ЭВМ.

- Экспериментально определены КТС для пар материалов КМК-МС / 12Х18Н10Т / ТВ-36, образующих контактные соединения в ЖРД малой тяги, в различных средах (вакуум, атмосфера) в широком диапазоне температур и давлений. На основе разработанной методики проведена оптимизация конструкции контактных узлов.

- Исследовано влияние теплофизических и механических свойств материалов и анизотропии композиционных материалов на величину КТС.

- Исследовано влияние микрогеометрии, сжимающих нагрузок, наличия покрытий и циклического нагружения на величину КТС.

- Исследовано влияние лучистого теплообмена на величину КТС в широком диапазоне сжимающих нагрузок и температур эксплуатации.

- На основе макета цифрового двойника микрорельефа создана многопараметрическая конечно-элементная модель термо-механического взаимодействия контактирующих поверхностей, с учётом анизотропии теплофизических и механических свойств и сложного теплообмена внутри контакта.

- Получены синтетические данные по контактному термическому сопротивлению пар материалов в широком диапазоне изменения граничных условий и свойств контактирующих материалов.

- Разработана и верифицирована нейросетевая модель (BP-ANN, RBF) для быстрого прогнозирования контактного термического сопротивления на основе синтетических данных, полученных на основе макета цифрового двойника контактных пар.

- На основе разработанной методики термомеханического взаимодействия контактных пар, проведена оптимизация узлов теплонапряжённых объектов: элементов конструкции газотурбинных и жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

### **Научная новизна**

1. Впервые разработана методика создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, объединяющая два взаимодополняющих алгоритма фильтрации: метод вершин и метод локальных экстремумов. Данное решение преодолевает принципиальное ограничение традиционных подходов, описанных в работах классиков контактной механики (Гринвуда, Уильямсона, Меснянкина, Демкина), которые либо не учитывают особенности реального микрорельефа, либо требуют для моделирования слишком больших вычислительных ресурсов. Предложенная методика обеспечивает оптимальный баланс между точностью математического описания и вычислительной сложностью, что позволяет достаточно комфортно применять разработанный подход к тепловому проектированию.

В отличие от исследований зарубежных учёных (Majumdar, Bhushan, Cooper, Yovanovich) опиравшихся при оценке состояния микрорельефа поверхности на статистические модели и гауссовы распределения неровностей, в представленной работе предлагается физически обоснованный подход, сохраняющий топологические особенности реальной поверхности, сформированной на основе фрактальной модели Вейерштрасса-Мандельброта. Восстановление микрорельефа осуществляется по профилограмме поверхности с верификацией не только по параметру  $R_a$  (среднеарифметическое отклонение профиля), но и по форме относительной опорной кривой и параметру  $R_q$  (среднеквадратичное отклонение профиля), что обеспечивает высокую степень соответствия цифровой модели реальной поверхности. Данный подход подтверждается сравнением результатов с экспериментальными данными, полученными на профилометрах Mitutoyo SurfTest SJ-210 и лазерных микроскопах.



2. Впервые создана комплексная теоретическая модель, интегрирующая механику контакта шероховатых поверхностей с теплообменом в контактной зоне при учете лучистого переноса и влияния анизотропии свойств материалов на теплообмен. В отличие от классических моделей (Попова В.М., Шлыкова Ю.П., Малькова В.А., Fletcher, Mikic), которые дают погрешность до 300% из-за упрощения микрогеометрии и пренебрежения нелинейными эффектами, предложенная модель учитывает реальную топографию поверхностей, анизотропию свойств контактирующих материалов и механизмы стягивания линий теплового потока к фактическим пятнам контакта.

3. Экспериментально и численно обоснована значимая роль лучистого теплообмена при высоких температурах и низких сжимающих давлениях. Показано, что игнорирование вклада излучения в теплообмен приводит к существенной ошибке (до 46% при 0.14 МПа и 1073 К), что особенно критично для расчетов в безвоздушной среде. Результаты исследования опровергают устоявшееся мнение ряда авторов (Madhusudana, Lambert, Nao), которые утверждают, что вклад лучистого теплообмена при температуре до 1000 К не превышает 1–3%.

4. Впервые проведено исследование совместного влияния анизотропии свойств композитов и микрогеометрии контакта на величину КТС. Разработана методика параметризации углов ориентации волокон при моделировании композитных материалов, что позволило выявить оптимальные углы армирования углеродных композитов для минимизации термического сопротивления. Полученные результаты позволяют уточнить традиционные представления о том, что оптимальным является армирование  $[0^\circ]$  или  $[90^\circ]$ , демонстрируя преимущества комбинированных схем  $[0^\circ+90^\circ]$  и  $[\pm 60^\circ+90^\circ]$  для конкретных условий нагружения.

Созданная многопараметрическая конечно-элементная модель позволяет одновременно учитывать анизотропию теплофизических и механических свойств, пластические и упругопластические деформации микронеровностей, а также лучистый теплообмен в межконтактных зазорах. Такой многопараметрический

подход принципиально отличается от работ исследователей (Bahrami, Jackson, Zhang, Dai), которые рассматривали только отдельные аспекты проблемы, не обеспечивая комплексного подхода.

5. Впервые разработана и верифицирована нейросетевая модель для быстрого прогнозирования КТС на основе 8000+ виртуальных экспериментов, выполненных методом конечных элементов. В отличие от известных эмпирических и полуэмпирических моделей (Mikic, Yovanovich, Cooper, Negus), нейросетевой подход позволяет учитывать нелинейные взаимосвязи между множеством переменных (давление, температура, шероховатость, свойства материалов) и обеспечивает высокую точность.

Принципиальное отличие от известных работ (Zhan, Vu, Ren, Li) заключается в использовании синтетических данных высокой достоверности в качестве обучающей выборки, что преодолевает традиционную проблему недостатка экспериментальных данных для обучения моделей ИИ. Созданная модель может быть интегрирована в CAD/CAE-системы и цифровые двойники для оперативной оценки теплового состояния конструкций, что является инновационным решением в области проектирования энергоустановок.

6. На основе комплексного подхода к моделированию КТС впервые разработаны методики оптимизации конструкции замкового соединения керамических лопаток с металлическим диском газотурбинного двигателя и камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги с композитной оболочкой. Разработано и обосновано конструктивное решение узла стыковки с изменяемым углом сопряжения, что позволяет минимизировать термонапряжения, вызванные несогласованностью коэффициентов теплового расширения разнородных материалов.

В отличие от традиционных подходов, которые не учитывали контактное термическое сопротивление в явном виде, использование предложенной методики позволило снизить термонапряжения в конструкции в 2.5–3 раза при сохранении прочности и массогабаритных характеристик. Это решение подтверждено как экспериментальными исследованиями, так и промышленным внедрением.

Таким образом, научная новизна диссертационной работы заключается в создании комплексного, физически обоснованного подхода к моделированию и прогнозированию контактного термического сопротивления, базирующегося на цифровом двойнике микрорельефа поверхности, конечно-элементном моделировании с учетом анизотропии и лучистого теплообмена, машинном обучении и экспериментальной верификации модели, что позволяет снизить неопределенность в расчетах, создавая дополнительный инструмент проектирования для повышения эффективности и надежности перспективных энергоустановок.

### **Теоретическая значимость**

— Расширена теория контактного теплообмена за счёт включения нелинейных, мультифизических и анизотропных эффектов;

— Разработаны новые математические и алгоритмические методы цифрового моделирования микрогеометрии поверхностей;

— Разработана методика определения и прогнозирования тепловой проводимости и возникающих напряжений при контактном взаимодействии в теплонагруженных узлах и агрегатах.

— Установлена роль лучистого теплообмена в контактных соединениях космических аппаратов.

### **Практическая значимость работы**

Полученные в диссертационной работе результаты имеют широкую практическую значимость и могут быть применены для решения разнообразных задач в современных высокотехнологичных отраслях промышленности, а именно:

В авиационно-космической промышленности разработанные методики позволяют:

- Повысить точность прогнозирования тепловых режимов и ресурса газотурбинных двигателей за счет корректного учета контактного термического сопротивления в замковых соединениях керамических лопаток с металлическим диском, что особенно важно при переходе на высокотемпературные режимы эксплуатации.

- Оптимизировать конструкции камер сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги с композитными элементами, устраняя критические термические напряжения в зонах контакта разнородных материалов с различными коэффициентами теплового расширения.

- Улучшить тепловую защиту высокоскоростных летательных аппаратов за счет точного моделирования теплопередачи в многослойных структурах и соединениях теплозащитных экранов.

- Повысить эффективность систем терморегулирования космических аппаратов в условиях вакуума, где контактный теплообмен является основным механизмом передачи тепла между элементами конструкции.

В энергетике и теплообменном оборудовании результаты работы позволяют:

- Оптимизировать конструкции ребристо-трубчатых теплообменников за счет снижения контактного термического сопротивления между трубками и ребрами, что увеличивает их КПД на 5-7% и снижает массогабаритные показатели на 12-15%.

- Повысить надежность ядерных реакторов за счет более точного прогнозирования теплового состояния топливных сборок и предотвращения локальных перегревов в зоне контакта оболочки и топливных таблеток.

- Улучшить эффективность топливных элементов и систем накопления энергии за счет оптимизации тепловых режимов в биполярных пластинах и мембранно-электродных блоках.

В микроэлектронике и электронной технике разработанные подходы обеспечивают:

- Повышение надежности радиоэлектронных компонентов за счет эффективного отвода тепла от высокомоощных микросхем и предотвращения их перегрева.

- Оптимизацию тепловых интерфейсов в системах охлаждения электроники, включая применение термоинтерфейсных материалов с заданными теплопроводными характеристиками.

В транспортном машиностроении полученные результаты позволяют:

- Улучшить характеристики тормозных систем автомобилей за счет оптимизации теплового режима в зоне контакта колодок и дисков, что снижает риск перегрева тормозной жидкости и повышает безопасность движения.

- Разработать композитные тормозные диски с адаптивной теплопроводностью, обеспечивающие высокую эффективность торможения при снижении массы на 30-50% по сравнению с чугунными аналогами.

В промышленных технологиях результаты работы способствуют:

- Созданию новых композиционных материалов с заданными тепловыми свойствами за счет управления структурой межфазных границ и оптимизации микротопографии контактирующих поверхностей.

- Разработке технологий нанесения функциональных покрытий, снижающих контактное термическое сопротивление в высокотемпературных соединениях.

- Улучшению эксплуатационных характеристик аддитивно-изготовленных деталей за счет оптимизации параметров 3D-печати для получения необходимой микрогеометрии контактных поверхностей.

В системах проектирования и диагностики практическая ценность результатов заключается в:

- Разработке и внедрении в CAD/CAE-системы нейросетевых моделей предсказания контактного термического сопротивления с точностью  $\leq 2.5\%$ , что значительно сокращает время численного моделирования тепловых процессов.

- Создании цифровых двойников контактных узлов, позволяющих проводить виртуальное прототипирование и оптимизацию конструкций на ранних стадиях проектирования без проведения дорогостоящих натурных испытаний.

- Разработке высокоточных экспериментальных установок для определения КТС с погрешностью  $\leq 7\%$  в широком диапазоне температур (от криогенных до  $1000^{\circ}\text{C}$ ) и давлений (от 0.1 до 10 МПа), которые могут служить эталонными при калибровке промышленных измерительных комплексов.

- Создании базы эмпирических зависимостей КТС для пар материалов, актуальных в современных инженерных приложениях, включая композиционные материалы, керамику и разнородные металлические соединения.

Экономический эффект от внедрения разработанных методик и решений проявляется в:

- Сокращении сроков проектирования новых изделий за счет перехода от итерационного проектирования к предсказательному моделированию тепловых процессов.

- Повышении ресурса и надежности теплонагруженных узлов и агрегатов на 25-30% за счет оптимизации тепловых режимов.

- Снижении материалоемкости конструкций благодаря более точному прогнозированию температурных полей и возможности использования современных композиционных материалов.

Таким образом, практическая значимость полученных результатов заключается в создании универсального инструментария для решения комплекса задач, связанных с прогнозированием и оптимизацией тепловых процессов в контактных соединениях современных технических систем. Это способствует повышению энергоэффективности, надежности и ресурса изделий, а также формированию научно-технического задела для создания перспективных конструкций в различных отраслях промышленности.

#### **Методология и методы исследования.**

- Теоретический анализ фундаментальных работ по контактному теплообмену;

- Экспериментальные методы: профилометрия (Surftest SJ-210), измерение КТС в стационарном и нестационарном режимах;

- Численное моделирование: метод конечных элементов (ANSYS Mechanical, ANSYS Thermal);

- Цифровое моделирование микрорельефа: авторское ПО для генерации облака точек и поверхностей;

— Фрактальный анализ: авторское ПО для построения поверхностей по функции Вейерштрасса–Мандельброта с определением параметров D и G через структурную функцию, а также через определение параметра Хёрста.

— Машинное обучение: обучение BP-ANN и RBF-сетей на базе 8000+ виртуальных экспериментов.

### **Положения, выносимые на защиту.**

- Методика создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, объединяющая два алгоритма фильтрации: метод вершин и метод локальных экстремумов.
- Комплексная математическая модель, интегрирующая механику контакта шероховатых поверхностей и теплообмен в контактной зоне.
- Результаты исследования роли лучистого теплообмена при высоких температурах и низких сжимающих давлениях в зоне контакта.
- Результаты исследования совместного влияния анизотропии свойств композитов и микрогеометрии контакта на величину КТС.
- Нейросетевая модель для быстрого прогнозирования КТС
- Комплексная методика расчета контактного термического сопротивления, объединяющая измерение, конечно-элементное моделирование и машинное обучение, позволяющая снизить неопределённость в расчётах КТС до приемлемого для проектирования уровня (не более 7%).
- Технические решения, относящиеся к конструкциям контактных узлов в ЖРД малой тяги и газотурбинных двигателей.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов обеспечена использованием фундаментальных законов теплофизики, теплообмена, термомеханики, верификацией конечно-элементных моделей на аналитических зависимостях, собственных и литературных экспериментальных данных. Основные положения диссертационной работы доложены на научно-технических конференциях всероссийского и международного уровня:

- XXXVIII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» - ММТТ-38 (Самара, 2025 г.);
- «XLI Сибирский теплофизический семинар» - СТС-41 (Новосибирск, 2025 г.);
- Минский международный форум по тепло- и массообмену - ММФ (Минск, 2016, 2022, 2024);
- Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (Минск, 2023);
- Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (Алушта 2016, 2017, 2018, 2020);
- Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки», (Москва, ЦИАМ, 2019 г.)
- Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» - ICMТMTE 2020, 2021 (Севастополь, 2020 г.)
- Advanced Materials & Demanding Applications – AMDA 2020 (UK, Wrexham Glyndwr University, 2020)
- Королевские академические чтения по космонавтике (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 2018, 2019)
- Международная научно-практическая конференция «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии. сборник материалов» (Москва, МГТУ им. Баумана, 2019 г.)
- Научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Тольятти 2015, 2016),
- Всероссийская научно-техническая конференция памяти профессора А. В. Алиева. (Ижевск, 2024 г.)
- Научно-техническая конференция молодых инженеров «Энергия молодости» (Санкт-Петербург, 2025 г.)



-Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении» (Москва, ЦИАМ, 2015),

- XI Международная конференция пользователей ANSYS/CADFEM, (Москва 2014),

- Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2014, 2015, 2016, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025),

- Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике» (Москва, МАИ, 2014, 2015),

- Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, МАИ, 2016, 2017, 2018, 2019),

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 75 печатных работах, из них 25 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК, и приравненных к ним по научной специальности диссертации, 52 тезиса докладов на научных конференциях, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Все представленные в диссертации результаты получены при непосредственном участии автора, причем автору принадлежат все новаторские идеи, изложенные в работе. Экспериментальные исследования, обработка результатов, подготовка к публикациям выполнялась вместе с соавторами.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения, списка обозначений, библиографии и 2 приложений. Общий объем диссертации 491 страница. Библиография включает 456 наименований.

# **Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНЫХ УЗЛАХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

## **1.1. Газотурбинные установки**

### **1.1.1 Текущее состояние проблемы в области используемых материалов**

Эволюция теплофизических свойств материалов в энергоустановках прошла несколько этапов. В середине XX века основными материалами для газотурбинных двигателей (ГТД) стали никелевые и титановые сплавы, обладающие высокой жаропрочностью. Однако их удельная масса ( $7,5\text{--}8\text{ г/см}^3$ ) и ограниченная температурная устойчивость (до  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) стимулировали поиск альтернатив. В 1980-х годах началось активное внедрение композиционных материалов (КМ), таких как углепластики и керамоматричные композиты (C-SiC) [78]. Ключевым прорывом стало создание монокристаллических никелевых сплавов, позволивших повысить рабочую температуру до  $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Современные исследования сосредоточены на гибридных материалах и наноструктурированных покрытиях, что открывает путь к снижению массы и повышению КПД энергоустановок.

Ключевой проблемой остаются контактные соединения разнородных материалов, где возникают значительные перепады температур из-за термического сопротивления. Это приводит к локальным перегревам, снижению ресурса и даже катастрофическим отказам.

Зарубежные исследования в области авиационных технологий демонстрируют достаточно обнадеживающие результаты. Например, в рамках программы NASA Advanced Air Transport Technology (AATT) ведутся работы по созданию композитных лопаток для газотурбинных двигателей, способных работать длительное время без потери эксплуатационных характеристик [78]. Компания Rolls-Royce также добилась прогресса: в новых двигателях UltraFan применяются гибридные диски из металла и композитов, что позволило снизить их массу на 40%. Европейские ученые сосредоточились на оптимизации теплообмена в сопловых частях двигателей с использованием керамических матриц, что особенно актуально для высокотемпературных режимов.

Экспериментальные данные подтверждают преимущества разрабатываемых материалов. Так, лопатки из керамоматричного композита C-SiC выдерживали температуры до 1600 °C и центробежные нагрузки в 300 МПа, демонстрируя ресурс на 67% выше, чем у металлических аналогов [78]. В России успешным примером стало внедрение композитных лопаток в двигатель ПД-14, где такое решение позволило снизить расход топлива на 5,2%, и массу на 50%, но потребовало решения задач по их надежному соединению с металлическим диском [79]. Следует отметить, что внедрение композитов сопряжено с трудностями. В проекте LEAP (совместная разработка CFM International) обнаружилась хрупкость композитных элементов при ударных нагрузках, что потребовало создания специальных защитных покрытий. Эти примеры подчеркивают необходимость дальнейших исследований для преодоления технологических барьеров.

#### **1.1.2 Контактные узлы перспективных ГТД . Крепление лопаток турбин.**

Продление ресурса эксплуатации компонентов и оптимизация межремонтных интервалов остаются критически важными задачами для современных газовых турбин, что подтверждается анализом экономической эффективности энергосистем [80]. В контексте оценки долговечности лопаточного аппарата заслуживает внимания вероятностный анализ, выполненный авторами [81]. Их исследование 15 факторов деградации роторных лопаток паровых турбин выявило, что контактное термическое сопротивление оказывает 12%-е влияние на энергопотребление в течение жизненного цикла, занимая четвертую позицию в рейтинге значимости. Этот результат подчеркивает необходимость достоверного контроля термических характеристик контактных поверхностей при проектировании.

Эксплуатация паровых турбин нередко сопровождается возникновением повышенных пусковых нагрузок, обусловленных колебаниями мощности. В этой связи особую актуальность приобретают методы нестационарного теплового анализа, позволяющие отслеживать температурную динамику компонентов в режиме реального времени. Как показала практика, коэффициент КТС играет

ключевую роль в прогнозировании пространственно-временного распределения температурных полей в роторных системах. В работе [82] продемонстрирована перспективность применения экспериментально верифицированных моделей КТС, однако использованная авторами методология опирается не на актуальные топологические данные, а на исторические экспериментальные результаты, что может ограничивать точность расчетов.

С позиции материаловедения наиболее эффективной стратегией увеличения ресурса лопаток остается нанесение термобарьерных покрытий (ТВС). Данная технология, подробно описанная в обзорах [83], позволяет снизить температуру поверхности на 100-300°C, существенно замедляя процессы ползучести и окисления. Оптимизация толщины таких покрытий, в условиях высоких тепловых потоков, требует комплексного подхода, где данные по КТС служат основой для моделирования термических напряжений [84].

Экспериментальные исследования в области измерения КТС для теплозащитных экранов камер сгорания подтвердили корреляцию между расчетными и реальными температурными профилями при идентичных граничных условиях [80]. Однако, сохраняется дефицит экспериментальных данных по КТС для экстремальных режимов эксплуатации, что актуализирует необходимость развития диагностических методик [85-87].

Лопатка турбины является ключевым элементом турбинной ступени газотурбинного двигателя, предназначенным для преобразования энергии высокотемпературного газа, поступающего из камеры сгорания, в механическую работу. Именно лопатки турбины чаще всего определяют ресурс и предельные характеристики газовой турбины в целом [88].

В процессе эксплуатации лопатки подвергаются воздействию экстремальных термомеханических нагрузок. Центробежные силы, возникающие при вращении ротора на скоростях до десятков тысяч оборотов в минуту, создают значительные растягивающие напряжения. Особенно высокие температуры испытывает лопатка первой ступени, непосредственно расположенная за камерой сгорания: температура газа может достигать 1370 °C. В связи с этим материалы

лопаток должны обладать не только жаропрочностью (способностью сохранять механическую прочность при высоких температурах), но и жаростойкостью — устойчивостью к окислению и коррозии в агрессивной газовой среде.

Помимо термостойкости, к материалам лопаток предъявляются следующие требования: низкая чувствительность к концентрации напряжений, высокая устойчивость к термической усталости, технологичность и приемлемая стоимость.

Важным фактором надёжности является динамическая прочность: на лопатки действуют периодически изменяющиеся аэродинамические и вибрационные нагрузки. При совпадении частоты внешнего возбуждения с одной из собственных частот колебаний лопатки возникает резонанс, приводящий к резкому росту амплитуды колебаний и напряжений. Это может вызвать усталостный излом, который чаще всего возникает в наиболее нагруженных зонах: по перу или в замковом соединении. Разрушение даже одной лопатки зачастую приводит к каскадному повреждению остальных лопаток текущей и последующих ступеней.

В перспективе применения новых материалов для повышения рабочих температур рассматриваются керамические лопатки, способные работать в условиях, превышающих пределы применимости традиционных металлических сплавов. Однако возникает проблема их соединения с ротором, поскольку керамика плохо воспринимает растягивающие нагрузки. Возможны три основных конструктивных подхода:

1. Цельнокерамический ротор — технологически сложен и чувствителен к дефектам;
2. Раздельное изготовление диска и лопаток из керамики с последующей сборкой требует надёжного соединения, устойчивого к термическим и механическим нагрузкам;
3. Гибридная конструкция: металлический диск и керамические лопатки, соединённые замковым узлом — наиболее реалистичный вариант на современном этапе.

С точки зрения материаловедения, поведение материалов при высоких температурах определяется их микроструктурой. При нагреве повышается подвижность атомов, и границы зёрен начинают мигрировать под действием механических напряжений (см. Рис. 1.1), что приводит к явлению ползучести [89].

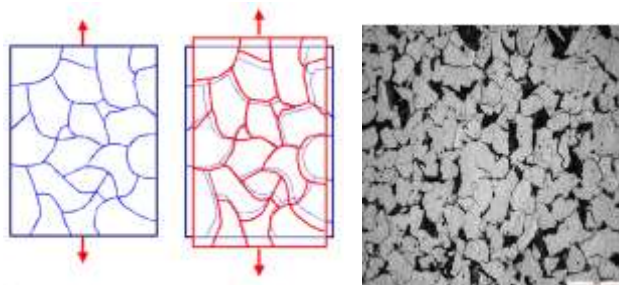


Рис.1.1. Границы зерен металлических сплавов

Например, в сталях формируются двухфазные структуры: твёрдая, но хрупкая фаза (чёрная на рисунке) и пластичная, вязкая фаза (белая на рисунке). Несмотря на высокую прочность при комнатной температуре, сталь обладает низким сопротивлением ползучести при рабочих температурах газовых турбин, что приводит к постепенному удлинению лопаток, нарушению зазоров и, в конечном итоге, к их разрушению.

В современных газовых турбинах для производства лопаток используются преимущественно никелевые суперсплавы, а в некоторых компрессорных ступенях —титановые сплавы. Благодаря направленной кристаллизации или получению монокристаллической структуры удаётся значительно увеличить размер зёрен или полностью устранить границы зёрен. Это резко снижает интенсивность ползучести, поскольку движение дислокаций и диффузия вдоль границ зёрен — основные механизмы высокотемпературной деформации — подавляются.

Последние исследования керамических матричных композитов или КМК (СМС) показали, что волокнистый материал, может обеспечивать необходимые характеристики ползучести, сопоставимые с монокристаллическими никелевыми сплавами. Плюс композит имеет гораздо более высокие температуры плавления, чем никель, это позволяет КМК работать при высоких температурах без дополнительного охлаждения (Рис.1.2.).

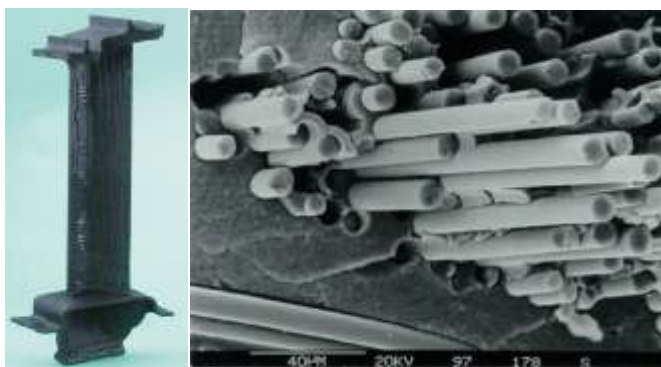


Рис.1.2. Композитная лопатка и структура волокон [78]

В турбинах высокого давления для металлических лопаток наибольшее распространение получили замковые соединения «ёлочного» типа. Рис.1.3.). [90]. В отечественном двигателестроении геометрические параметры профиля регламентированы отраслевым стандартом ОСТ 110975-81.

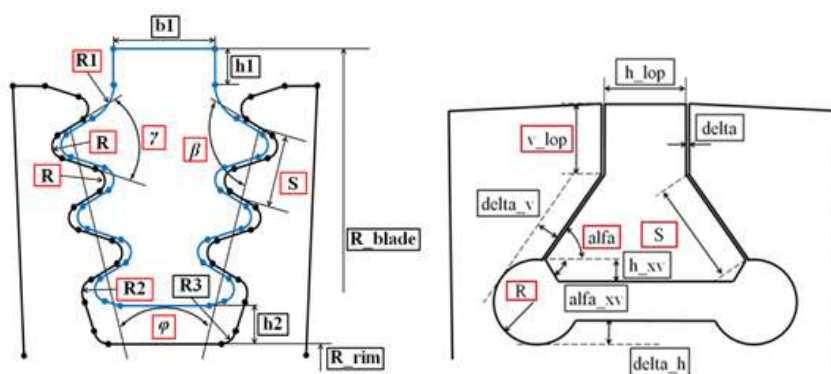


Рис.1.3. Замковое соединение «ёлочного» (слева) типа и «ласточкин хвост» (справа) [90].

Клиновидная форма замкового соединения обеспечивает равномерность нагружения зубьев. Зубья работают на срез, изгиб и смятие, а сечения по впадинам замка лопатки и выступа диска – на растяжение. С увеличением числа зубьев уменьшается сила, действующая на каждый зуб, однако возрастают растягивающие напряжения во впадинах зубьев. При проектировании замкового соединения с керамическими лопатками необходимо использовать конструктивные решения, позволяющие минимизировать растягивающие напряжения.

Широко распространены также соединения керамических лопаток с металлическим диском типа «ласточкин хвост», геометрические параметры профиля которого регламентированы отраслевым стандартом ОСТ 111031-81.

Увеличение угла наклона контактной площадки позволяет разместить большее число лопаток в диске. При этом возрастает величина контактного давления. Максимальные растягивающие напряжения возникают в радиусе перехода контактной грани замка к профилю лопатки.

Поскольку через соединение лопаток и рабочего колеса, проходят высокоинтенсивные тепловые потоки, то изменяя условия теплообмена между деталями можно воздействовать на температурный режим корпуса двигателя, что важно не только на стационарном режиме полета, но и на переходном.

Для того чтобы определить температурное состояние деталей турбины, в особенности разъемных, необходимо знать возникшее термическое сопротивление. Учет термического сопротивления необходим при проектировании для обеспечения надежной работы турбины: зная величину контактного термического сопротивления, возникающую в замковых соединениях, возможно оценить уровень температуры и работоспособность диска.

Можно утверждать, что взаимосвязь между фундаментальными исследованиями теплопереноса в элементах рабочих колес турбин и прикладными задачами повышения их надежности, определяет перспективные направления научно-технических разработок и опытно-конструкторских работ.

### **1.1.3 Контактные узлы перспективных ГТД . Сопло.**

Регулирование площади критического сечения сопла ГТД производится поворотом (закрытием) створок, шарнирно закрепленных на фланце форсажной камеры, перемещаемыми в осевом направлении роликами по направляющим, установленными на корпусе. Сверхзвуковая часть сопла и выходное сечение формировались «жидкими стенками» эжектора. Наружная часть сопла образовывалась «жестким» насадком.

Регулируемое сопло является теплонапряженным узлом. Внедрение в конструкцию газотурбинного двигателя регулируемого сопла из композиционных материалов, с применением схемы с разрывом контура сопла (Рис.1.4) позволяет в 1,5-2 раза уменьшить вес конструкции, обеспечить широкий диапазон



регулирования тяги двигателя, а также расширить температурный диапазон работы элементов сопла до 1 700 К и более.



Рис.1.4. Реактивное сопло авиационного двигателя из композитного материала

Использование схемы с разрывом контура сопла позволит оптимизировать расходно-тяговые и высотно-скоростные характеристики двигателя, а также повысить его экономичность на всех режимах работы при движении изделия по комбинированной траектории.

## 1.2. Теплообменные аппараты

Механическое соединение труб и ребер (развальцовка, сварка) неизбежно создает микроскопические зазоры, формирующие зоны повышенного теплового сопротивления. Исследования, представленные в [91,92] продемонстрировали, что вклад КТС в общее тепловое сопротивление достигает 6-18% для трубок диаметром 9.52 мм и 15-25% для 7-мм аналогов. Это объясняется обратной зависимостью между площадью контакта и погонной нагрузкой — уменьшение диаметра на 26% повышает долю КТС почти вдвое (Рис.1.5.).

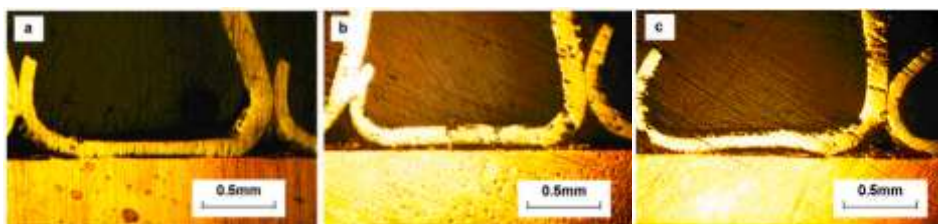


Рис. 1.5. Поверхность контакта ребристотрубчатых теплообменников при различных коэффициентах расширения составляет (а) 4,8 %; (б) 6,2 %; (в) 7,6% [93].

Также установлено, что увеличение диаметра развальцовочного пуансона на 20-30% снижает КТС на 12-15% за счет улучшения геометрии контактной зоны. Однако даже в оптимальных условиях КТС сохраняет вклад около 10% в общую

теплопроводность системы, что требует комплексного подхода оценки [94]. Прорывные результаты получены Tang и соавторами [93]: при коэффициенте расширения 4-6% КТС в паре «медная трубка – алюминиевое ребро» достигает 12 000 Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>. Такой результат стал возможным благодаря:

- Прецизионному контролю шероховатости поверхностей ( $Ra < 1.2$  мкм);
- Использованию интерметаллических прослоек для минимизации окисления;
- Динамической калибровке усилия развальцовки.

Анализ работ [95,96] подтверждает, что снижение КТС на 15-20% позволяет:

- Увеличить КПД теплообменника на 5-7%;
- Сократить массогабаритные показатели на 12-15%;
- Повысить ресурс соединений при термоциклировании в 1.8-2.2 раза.

Таким образом, современные тренды обеспечения заданных условий теплообмена требуют перехода от эмпирических методов к цифровому проектированию контактных узлов. Внедрение алгоритмов машинного обучения для прогноза КТС с учетом реальной топографии поверхностей и разработка композитных интерфейсных материалов с адаптивной теплопроводностью могут стать ключевыми направлениями для отрасли в ближайшее десятилетие [93,95]. Как показывает опыт, даже 10%-я оптимизация КТС снижает эксплуатационные затраты на \$ 0.8-1.2 млн/год для типовой ТЭЦ [91,96].

### **1.3. Атомная энергетика**

Проектирование оборудования АЭС требует экстремальной точности расчетов тепловых процессов, поскольку даже незначительные погрешности в оценке контактной теплопроводности могут привести к необратимым последствиям [97,98]. Особое внимание уделяется распределению температур в топливных стержнях, где перепад температур на границе определяет надежность всей системы (Рис.1.6.).

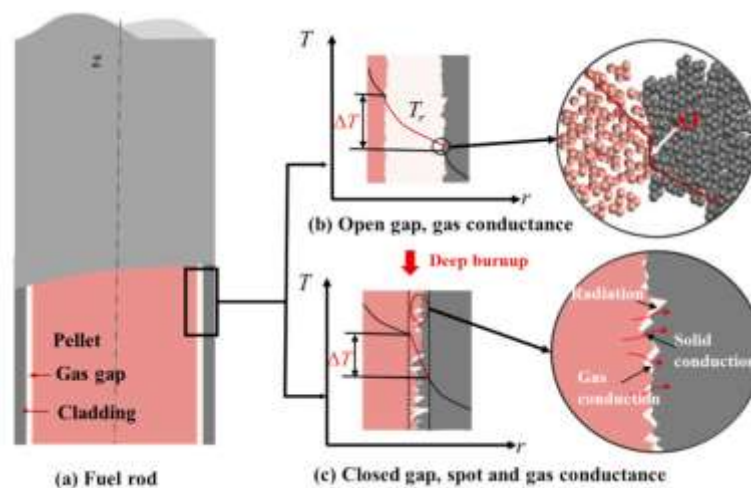


Рис. 1.6. Теплопередача между оболочкой и гранулой ядерного топливного стержня [97,98].

Экспериментально подтверждено, что модель Микича [99] наиболее адекватно описывает контактный теплоперенос в таких условиях, что критически важно для предотвращения локальных перегревов.

Несмотря на многоуровневые системы безопасности, риски аварий с потерей теплоносителя сохраняются. Примером служит инцидент в реакторе CANDU, где тепловая деформация напорных трубок привела к контакту с каландриевой трубкой, нарушив циркуляцию замедлителя [100]. Примечательно, что система отвода остаточного тепла распада в таких реакторах обеспечивает отвод лишь 84% энергии, что требует углубленного изучения контактной теплопроводности в зоне взаимодействия трубок для оптимизации аварийного охлаждения [101].

#### 1.4. Системы хранения и накопления энергии

В контексте развития топливных элементов (ТЭ) — ключевой задачей становится управление тепловыми режимами сборных систем [102]. Энергоэффективность ТЭ, достигающая 60-85% превосходит традиционные энергопреобразующие устройства, однако тепловая деградация компонентов ограничивает их ресурс [103,104].

Современные сборки (плоско-биполярные и трубчатые) теплообменных устройств требуют совершенствования терморегулирования. Изучение контактной теплопроводности между биполярными пластинами и мембранно-

электродными блоками открывает пути к созданию новых уплотнительных материалов [105,106]. В работе [107] продемонстрировано, что интеграция экспериментальных данных КТС в модели повышает точность прогноза температурных полей на 20-25%. Это особенно важно для систем с динамическими нагрузками, где нестационарный теплоперенос определяет эффективность алгоритмов управления [108].

Прогресс в исследовании контактной теплопроводности в атомной энергетике и объектов водородных технологий напрямую влияет на безопасность и КПД энергоустановок. Накопленный в этой области опыт подтверждает необходимость развития диагностики КТС для экстремальных условий [97,100,106].

## 1.5. Ракетные двигатели

### 1.5.1. Применение композиционных материалов при проектировании камер сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги

Применительно к ракетно-космическим системам, композиционные материалы весьма перспективны при проектировании камер сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРД МТ) [108-113], характерная конструкция которой представлена на рисунке 1.7. [114]

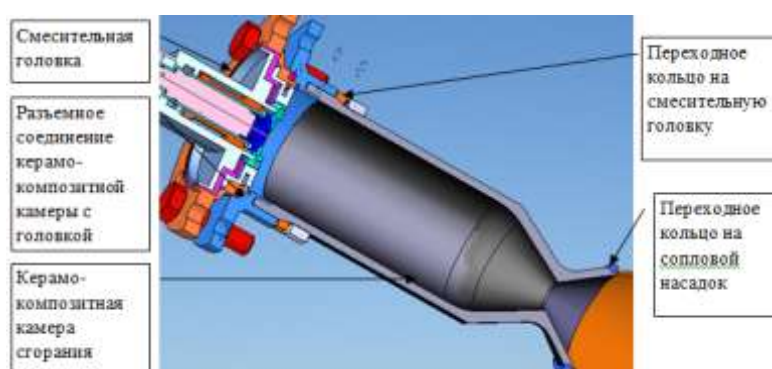


Рис. 1.7. - Модель ЖРДМТ МАИ-202К-200-ОК с композиционной камерой сгорания

Среди зарубежных конструкций подобного рода можно выделить конструкцию отображенную на рисунке 1.8. [109,113]

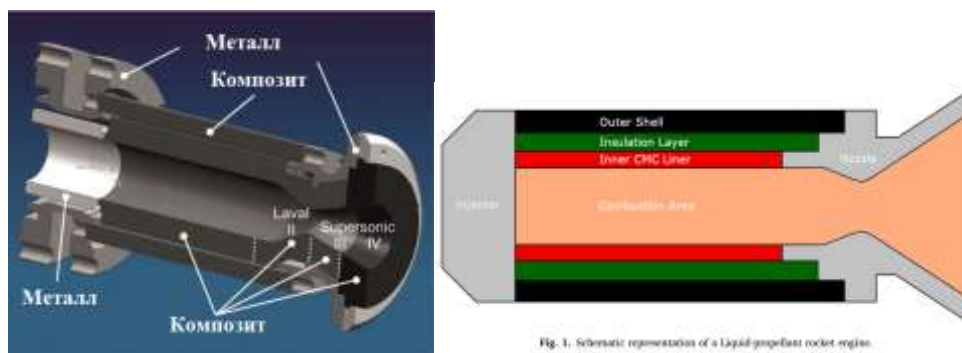


Рис.1.8. Камера сгорания двигателя ST-5 [109] слева, и справа [113]

Анализ приведенных конструкций показывает, что в связи с отсутствием технологий, позволяющих изготовить подобное изделие полностью из композиционных материалов, на практике приходится использовать соединяющие элементы конструкции из металла. В связи с этим перед разработчиками возникает проблема фиксации композитной камеры сгорания с помощью металлических фланцев и обеспечения её герметичности в процессе работы.

Основные разрушения конструкций выполненных из композитных материалов происходят в узлах стыковки разнородных материалов. При этом, разработчики связывают это с неизученностью процессов, происходящих в контактных узлах металлов с композиционными материалами.

Для поддержания требуемой силы удержания, а также надежности и герметичности конструкции при эксплуатации необходимо обеспечить требуемый тепловой режим и оптимальные значения давления в зонах контакта, а также условие запаса прочности для каждой из деталей в сборке. Для определения теплового режима конструкции необходимо учитывать неидеальность соединений, обусловленную реальной микрогеометрией соприкасающихся деталей и, в следствии этого, появления дополнительного перепада температур, связанного с наличием контактного термического сопротивления (КТС). Знание значения КТС и межконтактного давления между используемыми парами материалов позволяет оптимизировать решение задачи и обосновать достоверность результатов полученных в ходе решения.

Известные из литературы расчетные зависимости по определению КТС, как правило, ориентированы на специфические условия контактирования между достаточно ограниченного круга материалов. Как следствие такой ситуации, значения контактных термических сопротивлений, рассчитанные по этим зависимостям имеют достаточно большой диапазон разброса [88, 114-116].

Ввиду сложности решения задачи определения КТС, при создании сложных конструкции, традиционно принималось, что контакт между элементами конструкции идеальный, и термическое сопротивление отсутствует. Всё это приводит к недостоверной оценке распределения теплового потока и, как следствие, эквивалентных напряжений по всей конструкции в целом, что в конечном счете сказывается на ресурсе изделия. [2,34,117]

#### **1.5.2. Узлы соединений в конструкциях жидкостных ракетных двигателей малой тяги**

Условно, соединения узлов и агрегатов жидкостных ракетных двигателей малой тяги можно подразделить на разъемные (разборные) и неразъемные (неразборные) [117].

Каждое разъемное соединение создает определенную вероятность нарушения его герметичности. Поэтому при разработке конструкции узлов жидкостных ракетных двигателей малой тяги обеспечивают относительно небольшое число разъемных соединений, для чего используют рациональную компоновку, объединяют несколько агрегатов в одном корпусе, исключают излишние переходные детали.

К разъемным соединениям относятся резьбовые ниппельные и фланцевые соединения. Герметичность фланцевых соединений (Рис. 1.9., а и б) обеспечивается обжатием прокладки при стягивании фланцев с помощью болтов или шпилек, при этом на поверхности прокладки создается требуемое контактное давление.

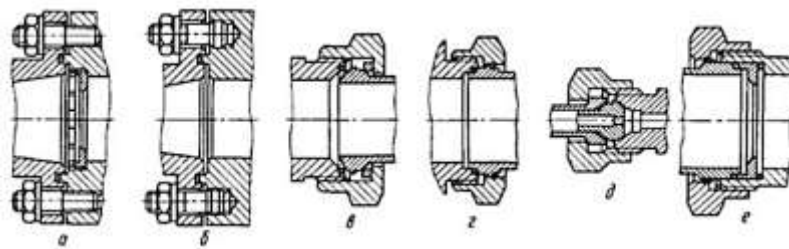


Рис.1.9. Фланцевые соединения жидкостных ракетных двигателей малой тяги

Герметичность резьбовых ниппельных соединений (Рис. 1.9. , в, г, д и е) достигается путем обжатия прокладки из мягкого металла при затяжке накидной гайки. Ниппель соединяют с трубой с помощью сварки или пайки.

Обычно, металлические прокладки изготавливают из стали, меди, алюминия и других металлов. Указанные материалы обладают высокой термической и химической стойкостью и высокой прочностью. Однако эти материалы плохо следуют изменениям формы поверхностей соединения. Сила сжатия соединяемых деталей при использовании металлических прокладок должна быть достаточно высокой, а поверхности соединяемых деталей должны быть хорошо обработаны и не должны подвергаться деформации при затяжке соединения, поскольку одним из основных факторов, определяющих тепловую проводимость контакта, является состояние контактирующих поверхностей.

Существенным недостатком металлических прокладок является чувствительность к температурным деформациям деталей соединения, если они изготовлены из металлов и сплавов с различным коэффициентом теплового расширения, что может привести к разному по времени, объемному расширению деталей и вызвать поломку конструкции. Однако в ряде случаев специально подбирают материалы фланцев и прокладки с такими коэффициентами теплового расширения, чтобы при изменении их температуры при работе двигателя обеспечивалось увеличение давления в месте контакта прокладки и фланцев и необходимая площадь фактического контакта поверхностей. Таким образом, герметичность соединений с прокладкой зависит от правильного выбора материала и давления в месте контакта. Помимо учета температурной деформации самой прокладки, необходимо учитывать температурные деформации элементов соединения ЖРД МТ.

Для обеспечения стабильного функционирования системы необходимо снизить температурные напоры в узлах соединений деталей, которые возникают вследствие сгущения линий теплового потока при прохождении через места фактического контакта поверхностей. Для оценки потерь температурного напора вводится понятие контактного термического сопротивления [88, 114-116], и от того насколько достоверно оно рассчитано зависят дальнейшие действия разработчиков.

К неразъемным соединениям относятся сварные и паяные соединения. Из сварных соединений (Рис. 1.10. а, б) наиболее надежно стыковое, которое часто выполняют наложением сварного шва на подкладку (кольцевой буртик или участок трубки, вставляемый внутрь соединения); наличие подкладки исключает нежелательной проплав сварного шва. Стыковые сварные швы контролируются с помощью разнообразных методов дефектоскопии.

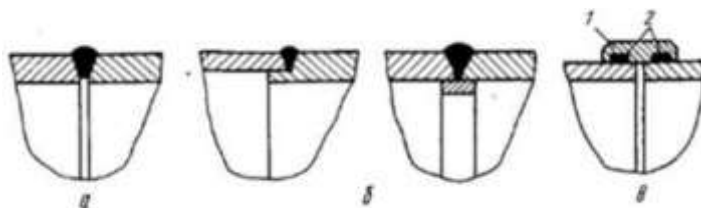


Рис.1.10. Сварные соединения ЖРД

При использовании сварных соединений устраняются массивные фланцы и болты (шпильки), что существенно уменьшает массу и размеры соединений узлов, агрегатов и трубопроводов. К недостаткам сварного шва можно отнести то, что они являются местом вероятного возникновения трещин из-за термических напряжений при застывании шва, что приведет к блокировки теплового потока и перегреву изделия.

Паяные соединения (Рис. 1.10., в) выполняются с соединительной муфтой. В ней обычно имеются две канавки, в которые предварительно закладывают кольца из припоя и расплавляют путем индукционного нагрева.

Паяные соединения в отличие от сварных можно применять при относительно невысоких температурах - обычно до 825 К.



Неразъемные соединения обладают существенно большей надежностью в обеспечении герметичности, практически не увеличивают гидравлическое сопротивление соединения и обладают наименьшей массой, но они требуют выполнения сварки или пайки соединений трубопроводов, узлов и агрегатов, в том числе непосредственно на двигателе.

Таким образом, конструкции жидкостных ракетных двигателей включает в себя множество соединений между элементами деталей (фланцевые, резьбовые, паянные, сварные соединения). Поскольку в большинстве случаев контакт в соединениях является дискретным, то происходит стягивание и удлинение линий теплового потока к контактными пятнам. Эти явления вносят существенные изменения в характер формирования температурного поля вблизи области контакта, а именно, повышают температурный градиент, образуется контактное термическое сопротивление, что ведет к локальному перегреву узлов конструкции, которое чаще всего ведет к выходу из строя всей конструкции в целом. Следовательно, учет контактного термического сопротивления в конструкциях ЖРД является одним из важнейших условий для достоверного определения теплового состояния на этапе проектирования конструкции. Особенно актуальна данная задача в безвоздушной среде, где возникающие контактные перепады температур наиболее значительны из-за отсутствия среды в межконтактном зазоре, которая могла бы выполнять роль проводника теплового потока.

### **1.6. Космические аппараты**

Контактное тепловое сопротивление также играет ключевую роль в обеспечении работоспособности космических аппаратов (КА). Рабочая среда КА характеризуется, низкими температурами, слабым гравитационным полем и вакуумом. Здесь вклад конвективного теплообмена минимален или вовсе отсутствует, поэтому основным механизмом передачи тепла становятся радиационный теплообмен и теплопроводность. Например, на борту космического спутника передача тепла между элементами конструкции осуществляется преимущественно через контактные поверхности. Эффективная

работа таких элементов, как приборы, крепежные узлы и монтажные панели, критически важна для нормального функционирования аппарата [118].

Поддержание оптимальной рабочей температуры является необходимым условием для обеспечения точности работы космического аппарата и продления срока его службы [118]. Поэтому в процессах теплового анализа и регулирования температуры спутников контактное тепловое сопротивление играет одну из ключевых ролей. Правильный учет и расчет этого параметра оказывают непосредственное влияние на тепловую архитектуру и эксплуатационные характеристики как ракет-носителей, так и самих спутников [119].

Космические аппараты функционируют в крайне суровых температурных условиях, где диапазон рабочих температур может варьироваться от минусовых значений до тысяч градусов Цельсия. При этом отдельные компоненты могут сохранять свою работоспособность только в строго заданном температурном интервале, что требует точного контроля процессов теплообмена между внутренними системами космического аппарата и его приборами.

С развитием космической техники и увеличением энергопотребления мощных спутниковых систем, обеспечение оптимального температурного режима всего аппарата приобретает особую значимость. Исследование контактного теплового сопротивления и проведение комплексных теоретических и экспериментальных работ позволяют эффективно управлять процессами теплопередачи внутри космического аппарата. Одновременно с этим, учитывая ограничения по массе и габаритам, актуальным становится поиск более эффективных методов отвода тепла, которые напрямую зависят от понимания и оптимизации контактного теплового сопротивления [120].

### **1.7. Тепловая защита летательных аппаратов**

При скоростях спускаемого аппарата выше 5 М аэродинамический нагрев вызывает тепловые потоки плотностью до 2 МВт/м<sup>2</sup>, что приводит к температурам свыше 2000°C в критических зонах (носовой обтекатель, кромки крыла) [121]. Такие условия создают экстремальный градиент между внешней поверхностью и внутренними системами аппарата, требуя многоуровневой

защиты. Современная тепловая защита, как правило, реализуется через многослойные структуры (Рис.1.11.):

- Внешний высокотемпературный слой (C/C, УНТС-керамика);
- Теплоизоляционный промежуточный слой (аэрогели, волокнистые композиты);
- Внутренний силовой каркас с терморегулирующими каналами [122].

Эффективность тепловой защиты на 40-60% определяется теплопроводностью межслойных контактов, соединённых болтовыми/заклёпочными интерфейсами [123]. Оптимизация КТС требует решения противоречия:

- *Завышение* — ведёт к перерасходу термостойких материалов (рост массы на 15-25%), снижая маневренность [124];
- *Занижение* — провоцирует локальные перегревы ( $\Delta T > 300^\circ\text{C}/\text{с}$ ), деградацию соединений и катастрофические отказы [125,126].

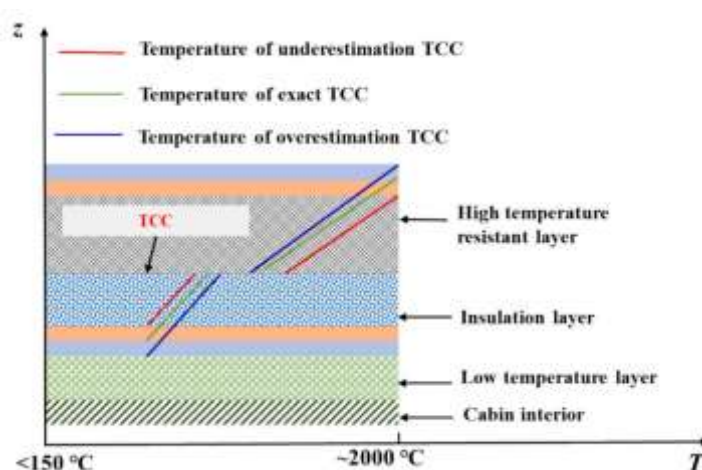


Рис.1.11. Схема многослойной тепловой защиты космического аппарата [121].

Практика показывает, что использование градиентных покрытий (функционально-градуированные материалы) снижает КТС на 18-22% за счёт минимизации термических напряжений в зоне контакта. Например, использование SiC/ZrB<sub>2</sub>-слоёв с плавным изменением коэффициента

теплопроводности позволило сократить массу носового обтекателя космического аппарата на 12% без потери термостойкости [122].

Однако сохраняются проблемы прогнозирования КТСС для динамических режимов. Численные модели, учитывающие топологию микрошероховатостей (метод Монте-Карло + FEM-анализ), демонстрируют погрешность 8-12% против экспериментальных данных [123]. Это актуализирует развитие гибридных подходов, сочетающих:

1. Определение контактной теплопроводности при комбинированных нагрузках (термомеханическое циклирование, окисление);
2. Машинное обучение для оптимизации геометрии соединений;
3. Аддитивные технологии создания интерфейсов с заданной анизотропией [124,126].

Гиперзвуковые системы требуют переосмысления классических принципов тепломассообмена. Как показывает опыт, даже 10%-ное улучшение точности прогноза КТС повышает ресурс тепловой защиты на 30-40% [137]. Однако прорыв возможен только через междисциплинарную кооперацию материаловедов, теплофизиков и специалистов по Big Data — именно это направление станет драйвером развития отрасли в следующем десятилетии [121,126].

### **1.8. Микроэлектроника**

Вопросу обеспечения теплового режима радиоэлектронных устройств, связанному с микроминиатюризацией и увеличением мощности электронных компонентов, начали уделять особое внимание с 80-х годов прошлого века с началом стремительного развития полупроводниковых технологий. Несмотря на постоянное улучшение внутренних функций и архитектуры чипов, вопросы эффективного отвода тепла и охлаждения остаются до сегодняшнего дня одними из наиболее актуальных.

Корпорация Microsoft уже в начале XXI века подчеркивала важность проблемы тепловыделения в компьютерных чипах, отмечая ее значительное влияние на общую работоспособность системы [127]. Исследования показывают,

что основной путь отвода тепла от микросхемы осуществляется посредством контактной теплопередачи. Однако архитектурные и конструктивные ограничения затрудняют повышение эффективности теплопереноса через контактные поверхности.

Рабочие характеристики электронных компонентов и чипов тесно связаны с температурным режимом внутри оборудования. По мере повышения плотности интеграции микросхем растет и плотность теплового потока, проходящего через электронные компоненты. В некоторых случаях эта плотность достигает значений порядка десятков Вт/см<sup>2</sup>, и тенденция роста сохраняется. Это требует разработки решений, способных обеспечить работу чипов при высоких температурах и поддерживать интенсивный обмен теплом, чтобы гарантировать стабильную работу оборудования. Для достижения этой цели необходимо углубленное исследование вопросов уменьшения контактного теплового сопротивления.

Миниатюризация и повышение степени интеграции электронных чипов приводят к увеличению удельного тепловыделения на единицу площади. Неправильная организация отвода тепла может привести к перегреву и повреждению чипа. Анализ показал, что значительная доля отказов электронных компонентов связана именно с высокими рабочими температурами. Повышение температуры на каждые 5°C увеличивает риск повреждения электронных компонентов примерно в полтора раза.

В системах отвода тепла электронных устройств передача тепловой энергии часто происходит через различные контактные поверхности. Наличие контактного теплового сопротивления на этих интерфейсах создает значительные препятствия для эффективного отвода тепла. Чем выше контактное тепловое сопротивление, тем больше перепад температур между этими поверхностями, что негативно сказывается на общем процессе охлаждения. [128-130]

Поэтому при разработке систем терморегуляции важно учитывать контактное термическое сопротивление и предусматривать мероприятия по его снижению.

## 1.9. Наземный транспорт

Процесс торможения транспортного средства связан с преобразованием кинетической энергии в тепловую за счет фрикционного взаимодействия колодок и диска [131]. Критическим фактором надежности выступает тепловая проводимость контакта в зоне трения. Экспериментально установлено, что образование микротрещин на поверхностях, вызванное абразивным износом, увеличивает КТС на 15-20% [132]. Это нарушает тепловой баланс системы, приводя к аккумуляции тепла в тормозной жидкости и её преждевременному испарению — одной из ключевых причин отказов гидравлических контуров [133].

Традиционные чугунные диски, несмотря на хорошую теплоёмкость, обладают избыточной массой, увеличивая энергопотребление на 5-7% [134-136]. Альтернативой выступают вентилируемые конструкции, диски из аустенитной стали AISI 304 с X-образным решетчатым сердечником. Их геометрия обеспечивает 90%-е рассеивание тепла через радиальные каналы, снижая термическую нагрузку на колодки. Однако внедрение таких решений требует пересмотра подходов к оценке КТС в условиях динамического контакта [137,138].

Практика показывает, что использование тормозных жидкостей с повышенным жизненным циклом даёт временный эффект. Базовым принципом должна стать интеграция тепломассообменных моделей в проектирование тормозных систем. В работе [139] продемонстрировано, что снижение пиковых температур на 40-60°C достигается за счет оптимизации КТС в паре «колодка-диск», что напрямую уменьшает испарение жидкости. Перспективным направлением остаётся разработка композитных материалов (углерод-керамика, металлические пены) с адаптивной теплопроводностью и массой на 30-50% ниже плотности чугуна [136].

Эволюция тормозных систем требует междисциплинарного подхода, сочетающего термомеханику контакта, материаловедение и точное моделирование нестационарных тепловых полей. Накопленный опыт подтверждает, что прогресс в этой области на 60-70% определяется совершенствованием методов управления КТС, что остаётся приоритетом для инженерных исследований [132,136,137].

## Выводы по Главе 1

Всесторонний теоретический анализ по проблематике контактного теплообмена в теплообменных устройствах и элементах авиационной техники, атомной энергетики, космических аппаратов, микроэлектроники показал, что фундаментальные работы Попова, Шлыкова, Малькова, Купера, Микича, Йовановича, Томаса и Проберта [88, 114, 115, 140–144] заложили основу для прогнозирования теплопереноса в контактных зонах теплонапряженных конструкций. Их полуэмпирические модели, разработанные во второй половине XX века, остаются отправной точкой при анализе стационарных режимов. Однако современные требования к системам терморегулирования в авиакосмической отрасли, микроэлектронике и ВИЭ выявили ограничения классических подходов [147].

Внедрение композитных материалов (SiC/SiC, C/C) в турбинные лопатки и теплозащитные экраны космических аппаратов позволяют снизить массу на 40-60%, но создаёт проблемы контактной деградации при термоциклировании [145]. Экспериментальные исследования показывают, что КТС в таких соединениях может снижаться на 30-50% после 1000 циклов «нагрев-охлаждение» из-за образования оксидных прослоек. Это актуализирует необходимость разработки гибридных моделей, объединяющих:

1. Молекулярно-динамическое моделирование на микроуровне;
2. Топологический анализ поверхностей методами машинного обучения;
3. Экспериментальную верификацию с использованием термографических методов [140,143].

Международный опыт (NASA, ESA, Роскосмос) демонстрирует, что синергия численных методов и физического моделирования позволяет сократить сроки разработки термостойких соединений на 25-30% [144]. Яркий пример — создание тепловых интерфейсов для спутниковых радиаторов, где учет КТС повысил эффективность теплоотдачи на 18% при вариациях температуры от -180°C до +200°C [145].

В качестве вывода по главе, можно сказать, что прогресс в области КТС определяется триадой «материалы-модели-методики». Как показывает практика, даже 10% улучшение точности прогноза КТС для сопряжений в газотурбинных установках снижают эксплуатационные расходы [141,144]. Однако для лидерства в отрасли требуются кооперация подходов, объединяющих экспериментальные данные, численное моделирование и международный опыт, что в конечном итоге позволит преодолеть существующие ограничения и вывести авиационно-космическую технику на новый уровень эффективности.



## ГЛАВА 2. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ КОНТАКТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ.

### 2.1. Существующие подходы к определению значения контактного термического сопротивления / проводимости

Исследованию процессов теплопередачи через соприкасающиеся поверхности посвящено значительное количество работ как зарубежных, так и отечественных. Следует отметить, что большинство исследователей проводят работы в совершенно разных, но тесно связанных областях. Контактное термическое сопротивление – сложная междисциплинарная проблема, включающая геометрические, механические и термические вопросы (Рис. 2.1.). Кроме того, основой расчета контактного термического сопротивления является характеристика шероховатой поверхности, а ядром его анализа – задача механического контакта двух поверхностей.

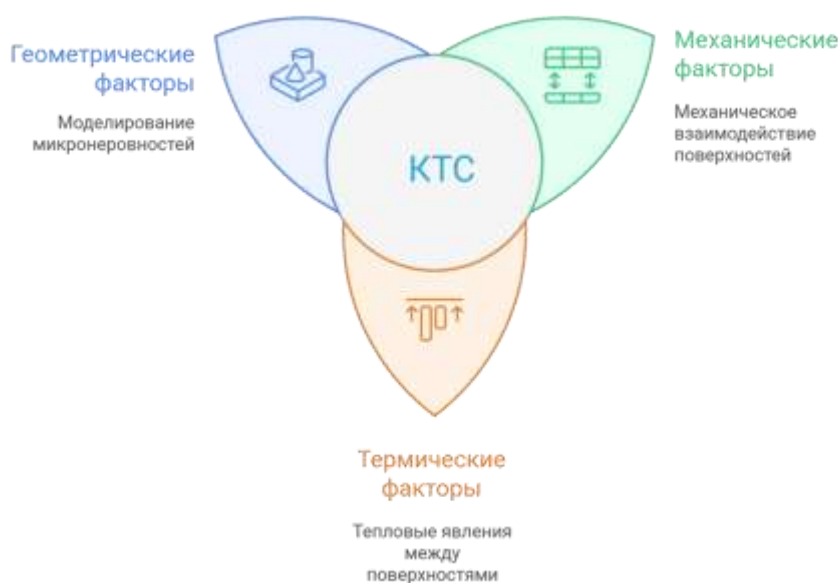


Рис. 2.1. Основные теории изучения KTC

Из теоретического анализа следует, что полная термическая проводимость контакта может быть представлена в виде суммы трех составляющих, а именно термическая проводимость мест фактического контакта  $1/R_m$ , термическая проводимость среды в контакте  $1/R_c$  и составляющая полной проводимости за счет излучения  $1/R_l$ .

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_l} \quad (2.1)$$

Как показано в уравнении (1), для получения теоретического решения для КТС необходимо рассчитать вклад трех механизмов теплопередачи. Однако до настоящего времени по ряду причин не представлялось возможным получить точное аналитическое выражение для КТС. К числу этих причин относятся:

(а) Учесть все тонкости рельефа шероховатых поверхностей бывает непросто. Поверхность инженерных материалов, от макро до микроуровня, может быть описана с помощью различных параметров, таких как плоскостность, волнистость и шероховатость [146]. Эти характеристики зависят от типа материала и производственного процесса, что значительно затрудняет точное определение всех особенностей рельефа. В настоящее время исследователи часто используют гауссовские модели поверхности, фрактальные функции и специальные инструменты для анализа рельефа. Однако каждый из этих методов имеет свои ограничения и может применяться только в определённых условиях.

(б) Анализ деформации двух шероховатых поверхностей, находящихся в контакте под воздействием внешнего давления и термической нагрузки, представляет собой невероятно сложную задачу [147]. Причин для возникновения контактной деформации множество: упругая деформация, пластическая деформация, упругопластическая деформация, ползучесть и тепловое расширение. Упругую деформацию можно рассчитать, используя классические методы механики, однако вычисление пластической деформации шероховатых поверхностей остается сложной задачей для исследователей.

(с) КТС представляет собой классическую проблему, связанную с топографией поверхности и термомеханической связью. Если характеристики поверхности не соответствуют действительности, то деформация контакта также будет неточной, что, в свою очередь, приведет к значительным различиям в термическом анализе. Кроме того, температура также оказывает влияние на деформацию контакта.

Несмотря на упомянутые ранее сложности, значительное количество ученых проделали огромную работу и достигли успехов в теоретическом изучении теории контактного теплообмена. В результате они смогли сформулировать несколько классических теоретических выражений. Как видно из уравнения (1), для получения общей теплопроводности необходимо учесть три основных компонента: проводимость через площадь фактического контакта, проводимость через межконтактную среду и теплообмен излучением. Таким образом, теоретическое выражение КТП можно разделить на три составляющие.

Анализируя доступные статьи и материалы конференций, можно прийти к выводу, что лишь малая часть авторов проводит полный термо-механический расчет соприкосновения шероховатых поверхностей. Значительное число работ посвящено моделированию контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, расчету площади фактического касания и межконтактного объема, но в статьях посвященных расчету и прогнозированию контактного термического сопротивления (КТС) об этих работах мало что указывается, либо совсем не указывается.

В задачах теплового проектирования пластинчатых теплообменных аппаратов, сверхпроводящих магнитов, разнообразных конструкций космических аппаратов, энергетических установок, практически всегда теплопроводность через зону контакта является основным механизмом передачи теплового потока. Количество публикаций по данному направлению так же подтверждает актуальность затрагиваемой тематики.

Условно, публикации можно разделить на следующие направления:

- публикации, в которых термическое сопротивление рассматривается в чисто физическом аспекте;
- экспериментальные работы, направленные на изучение новых типов контакта, и на разработку различных методов определения термической проводимости контакта;

– статьи, в которых обсуждаются специальные проблемы, касающиеся геометрии контакта, цикличности нагрузок, сопутствующих явлений в зоне соединений различных материалов;

– прикладные работы, описывающие внедрение передовых разработок в различные отрасли промышленности с целью снижения непроизводительных потерь температурного напора в различных конструктивных соединениях.

Поскольку физический смысл контактной термической проводимости такова, что это прежде всего явление поверхностного и объемного (вблизи поверхности контакта) стягивания линий теплового потока к фактическим площадям контакта образованным соприкосновениями микровыступов за счет приложенной внешней нагрузки, то большинство авторов различных методик прогнозирования КТС основываются на электрической аналогии контакта.

Часть из них являются продолжением теории, разработанной Рагнарсом Хольмом [148] для электрических контактов и распространенной им на тепловые соединения, в которой обобщаются результаты его публикаций, начиная с [149]. Тем не менее в процессе переноса энергии через контакт тепло- и электропроводностью существуют важные отличия [150]. Отличие процессов теплопроводности от электропроводности состоит в трудности управления распространением теплоты. Применяемые в ракетном и авиационном двигателестроении материалы допускают изменение электрической проводимости до 14 порядков, в то время как теплопроводность меняется лишь на 4 порядка [151]. Так же существует ряд различий между электрической емкостью и теплоемкостью [152]. Электрический контакт также имеет следующие особенности:

– при уменьшении пятна контакта при малой фактической площади контакта на пятне происходит значительное джоулево тепловыделение и происходит резкий локальный скачок температуры. Температура может возрастать на десятки и сотни градусов по сравнению с температурой внутри тела [153]. Это может привести к локальному расплавлению металла, изменению его механических свойств, нарастанию оксидной пленки;

– в зазоре может протекать туннельное движение электронов и образование дуг [154];

– локальный нагрев и, как следствие, локальное термическое расширение требуют решения одновременно термо-прочностно-электрической задачи.

Современные методы прогнозирования в основном опираются на различные типы соединений или разрабатываются для них. В большинстве инженерных проектов можно выделить шесть основных типов соединений, которые показаны на рисунке 2.2 [155]

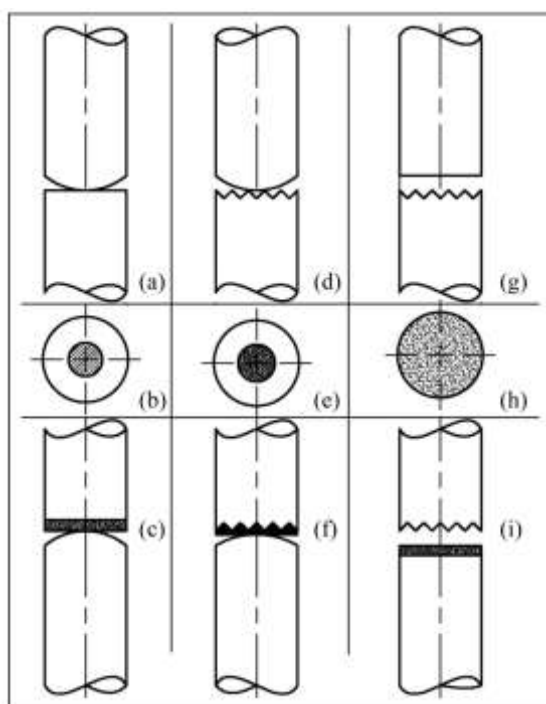


Рис. 2.2. Типичные контакты: (a) несоответствующие контакты, (b) область контакта несоответствующих контактов, (c) несоответствующие контакты с промежуточной средой, (d) грубые несоответствующие контакты, (e) область контакта грубых несоответствующих контактов, (f) грубые несоответствующие контакты. Соответствующие контакты с промежуточной средой, (h) площадь контакта с соответствующим шероховатым контактом, (i) соответствующий шероховатый контакт с промежуточной средой и (g) соответствующий шероховатый контакт. [155]

Именно на их основе создаётся большинство моделей. При разработке этих моделей учёные предполагали, что контакт является изотропным и имеет постоянную теплопроводность. Также предполагалось, что поверхности, которые соприкасаются, не имеют загрязнений, а конвективный и радиационный теплообмен незначительны. Кроме того, потери тепла минимальны, поскольку весь тепловой поток проходит через контактное соединение. Физические свойства тел, которые соприкасаются, не изменяются.

Р. Хольм одним из первых предложил использовать сопротивление стягивания, представляя канал прохождения электрического тока через фактические площади контакта как цилиндры с определенным радиусом.

По характеру образования КТС из-за наличия неровностей существует ряд публикаций, которые можно разделить на группы:

(а) Термическое сопротивление единичного микроконтакта [156-159], образованного плоской поверхностью и сферой или плоской поверхностью и конусом в вакууме. Эти модели рассматривают тепло, поступающее или выходящее через единственное пятно контакта. В таких ситуациях тепловое сопротивление известно как сопротивление распространению, когда линии теплового потока распространяются на расстояние, доступное через пятно контакта.

Идеальная модель с одним контактом должна учитывать область контакта на границе полубесконечного пространства. Сопротивление тепловому растеканию становится все более значимой темой, особенно в области управления теплом в электронике, где важно точно моделировать тепловое поведение распределителей тепла [160].

В большинстве доступных аналитических решений область контакта имеет круглую, эллиптическую, прямоугольную или правильную многоугольную форму. Эта модель также может быть упрощена до модели полубесконечного цилиндра, которая была проанализирована Микичем [161], Купером и другими [162], Гибсоном [163], Йовановичем [164], Негусом и Йовановичем [165].

Основываясь на результатах, полученных Роэссом и Микичем [161], Йованович [165] представил обобщенный численный прогноз для сопротивления тепловому сжатию коаксиальных цилиндрических контактов в зависимости от распределения теплового потока по произвольной площади контакта. Поскольку это решение основано на единственном пятне контакта и смежных сплошных пятнах, возникает необходимость рассмотреть реальный случай, когда пятна контакта разного размера имеют тенденцию распределяться по поверхности контакта. Путем простых манипуляций с типичными профилями сопрягаемых поверхностей в сочетании с приближением из теории деформации Купер и Йованович [162] смогли показать, что параметры, необходимые для прогнозирования теплопередачи, могут быть предсказаны таким образом. Этот

процесс в большей степени зависит от распределения нескольких высоких пиков на поверхностях, и именно здесь предполагается гауссово распределение высот. Таким образом, была представлена функция распределения. Сведя смешанную краевую задачу к интегральному уравнению Фредгольма с использованием стандартной процедуры, Гибсон [163] предложил точный подход к единичному идеализированному контакту, в то время как Негус и Йованович [165] разработали аналитическую технику для оптимизированных изображений, однако этот метод более применим для небольших точек контакта. Разави и др. [160] тем временем представляют обзор последних моделей сопротивления тепловому растеканию, охватывающий изменения, произошедшие до 2016 года.

Подробный анализ тепловых моделей приведен в работе [166], где внесены отдельные дополнения для частных случаев контактного теплообмена к хорошо известным решениям Роэссом и Йовановича.

Широкий анализ единичных моделей приведен в работе [166], в которой приводится необходимость рассмотрения сферических элементов, контактирующих между собой. Аналогичный подход реализован и в трудах зарубежных ученых [167, 168], детально рассмотревших тепловые процессы в модельных элементах.

На атомном уровне энергия переносится тепловыми частицами, и если пятно контакта очень маленькое, то эффект масштабной теплопроводности может быть поразительным.

Для изучения этой проблемы были использованы две модели: модель акустического рассогласования (АММ) и модель диффузионного рассогласования (DMM). Однако, когда речь заходит о слабо связанных атомах, эти модели оказываются неэффективными из-за слабых сил Ван-дер-Ваальса.

Прашер [169] предложил модель, основанную на АММ, для исследования температурного коэффициента рассеяния в Ван-Дер-Ваальсовых контактах. Эта модель учитывает влияние соответствующих параметров соединения на границе раздела.

Пратап и другие [170] также смогли исследовать влияние удержания воздуха при наноразмерной теплопередаче, используя обе модели. Они добились хорошего соответствия между экспериментальной работой и моделями. Недавно Чжу и его коллеги [171] с помощью модели DMM обнаружили, что она способна предсказывать дисперсию  $\text{UO}_2/\text{BeO}$  с точностью до порядка величин. Тем не менее, этот метод применим только для широкополосной дисперсии фононов.

Однако важно помнить, что теплопроводность через точки контакта двух твердых тел по-прежнему остается наиболее значимым способом передачи энергии. Поэтому точное измерение размеров и распределения всех точек контакта на границе раздела является необходимым шагом для определения площади поверхности контакта. Поэтому изучение рельефа поверхности играет ключевую роль в полном понимании проблемы КТС [172, 173].

(b) Термическое сопротивление многоточечного контакта в вакууме [168]; Ключевой задачей в исследовании КТС при многоточечном контакте всегда было точное определение реальной площади контакта, учитывая форму, распределение и размер пятен контакта. Кумар и Рамамурти [174] предложили метод Монте-Карло для оценки контакта между неровностями поверхности. В основе их подхода лежит предположение о гауссовом распределении неровностей на поверхностях. Расчеты проводились на различных материалах при различных контактных давлениях в условиях вакуума.

Модель особенно полезна для оценки пластической деформации контактирующих поверхностей. Теория фракталов, разработанная Мандельбротом в 1970 году, широко применяется для анализа топографии поверхностей. Она позволяет глубже понять, как форма поверхности влияет на физические свойства системы. Захуани и другие исследователи [175] использовали фрактальный анализ для описания и моделирования свойств поверхности, чтобы изучить механизм, связанный с деформацией шероховатости. В то время инструменты были ограничены, и модель могла быть основана только на поверхностях с шероховатостью до 50 мкм толщиной. Однако сегодня, с появлением высокоточных инструментов, фрактальный анализ по-прежнему



открывает широкие перспективы для анализа реальных неровностей на поверхности контакта [176, 177].

(с) Термическое сопротивление в контакте твердых тел с учетом поверхностной деформации [178-181]. Когда две поверхности соприкасаются и подвергаются сжатию, точки соприкосновения, по-видимому, увеличиваются с возрастанием нагрузки. В этих точках обычно наблюдаются микроконтактные деформации, возникающие в процессе попытки поверхностей выдержать давление. Эти деформации могут быть чисто пластическими, чисто упругими или эластопластичными.

В процессе деформирования сначала происходит упругая деформация, а с увеличением давления могут возникать упругопластические и чисто пластические деформации. Для полного анализа КТС также важно понимать различные типы деформации поверхности, возникающие при контактной теплопередаче.

Эббот и Файерстоун были первыми, кто предложил модель пластического контакта. Общая площадь контакта определяется как область деформации между поверхностью с высокой шероховатостью и поверхностью, которая считается жесткой и гладкой. В результате происходит уменьшение объема деформированных неровностей.

Позже Гринвуд и Уильямсон [142] ввели критерий, который указывает на тип контакта — индекс пластичности. Этот индекс представляет собой отношение упругой твердости к реальной твердости. Ма и другие [183] предложили новую модель для расчета параметров контакта и различных соотношений точек соприкосновения. Исследования показали, что КТС обратно пропорциональна шероховатости контактирующих поверхностей.

Шридхар и Йованович [184] провели сравнение существующих моделей пластмасс. Гладкие пары деформировались упруго, а более грубые — пластично. Это еще раз подчеркивает важность соответствующих значений микротвердости для оптимального функционирования поверхностей.

В течение многих лет было замечено, что фрактальные методы имеют свои недостатки. Например, фрактальная модель Маджумдара и Бхушана

предсказывает низкую пластическую деформацию при высоких нагрузках. Поэтому были предложены новые методы, которые учитывают различные масштабы шероховатости.

Микич [185] рассмотрел как упругую, так и пластическую деформацию при анализе контактных сил трения. Модель упругой деформации была создана на основе теории Герца. Однако модель не смогла учесть реакцию упругой деформации соседних микроконтактов и изменение микротвердости, что позже изучил Хегзай [186].

Бахрами и др. [187] разработали модель, которая учитывает эти эффекты для условий низкой нагрузки ( $< 0,1$  МПа). Используя трехмерную фрактальную функцию Вейерштрасса – Мандельброта и модель пластической деформации, Фанг и др. [188] создали модель КТС, основанную на методе Больцмана с многоблочной решеткой.

При моделировании упругопластического контакта крайне важно правильно определить тип деформации. Для этого перед разработкой моделей упругопластической деформации использовался индекс пластичности.

Шридхар и Йованович [168] впервые предложили КТП модель для шероховатых изотропных поверхностей, основанную на упругопластической модели контакта сферы с плоскостью.

Джексон и другие [189] создали многомасштабную модель упругопластического контакта между шероховатыми поверхностями, которая учитывает модель упругого контакта Герца и модель деформации упругопластической неровности.

Чжан и другие [190] разработали модель КТП, также основанную на шероховатых поверхностях, которые описываются фрактальной функцией Вейерштрасса–Мандельброта. Модель учитывает упругопластическую деформацию. В своём исследовании Дай и другие [191] предложили метод двойного литерационного соединения, который базируется на упругопластической деформации, происходящей при идеальных условиях

контакта в одной точке. Этот метод был разработан для изучения влияния теплового расширения на КТС.

(d) Влияние на контактный теплообмен макрошероховатости и волнистости поверхностей [88,114,192-195]. В работах, посвященных изучению крупномасштабных неровностей поверхности, было установлено, что волнистость и отклонение от плоскостности ведут к возрастанию КТС, а при малых нагрузках влияние волнистости является решающим [191, 192].

В [193] предлагается метод, базирующийся на построении случайного трехмерного температурного поля, который с учетом постоянно развивающегося математического аппарата теории вероятностей можно считать перспективным. Эта работа позволила выявить существенное влияние на контактные характеристики анизотропии свойств поверхностей и их взаимной ориентации.

(e) Численное решение сопряженной задачи контактного теплообмена и моделирование микрогеометрии поверхностей в системе твердых тел [1,3,4,197-238]. Одним из способов численного моделирования контакта является разбиение реального профиля, в результате чего он формализуется и представляется как набор стержней с элементарной площадью основания и соответствующей высотой. Числовая матрица с произвольным числом элементов, число которых равно фиксированному количеству элементарных площадок, расположенных на сопрягаемых поверхностях, является математическим аналогом такого геометрического представления [69]. Недостатком данного метода является отсутствие сил трения между смоделированными поверхностями. Этот метод похож на метод конечных элементов, но предложенный в одномерной прямоугольной постановке.

f) термическое сопротивление в контакте твердых тел с наличием заполнителя внутри контакта или оксидных пленок [239-247]. В работе [157] рассматривается тепловая модель контактного теплообмена между шероховатыми поверхностями, учитывающая искривление линий тока при их стягивании к пятнам фактического контакта, и на ее основе получено расчетное соотношение, определяющее величину контактного термического сопротивления при малых

давлениях. Но, к сожалению, в данной работе, как и в предыдущей, нет надлежащего ответа на правомерность переноса результатов на новые, в том числе композиционные материалы, применяемые в современном двигателестроении.

В [247] продемонстрировано, что контактное сопротивление определяется не только числом и размерами индивидуальных контактов, а также расстоянием между ними и равномерностью их расположения.

## 2.2. Существующие аналитические зависимости для расчета контактного термического сопротивления / проводимости

Несмотря на объем работ, посвященных описанию контакта микронеровностей взаимодействующих поверхностей, все они имеют различного рода допущения и упрощения относительно микрорельефа поверхности, часть из них получена для специфических условий эксплуатации (в которых был поставлен эксперимент) и справедлива для части исследуемых материалов (Рис.2.3.).

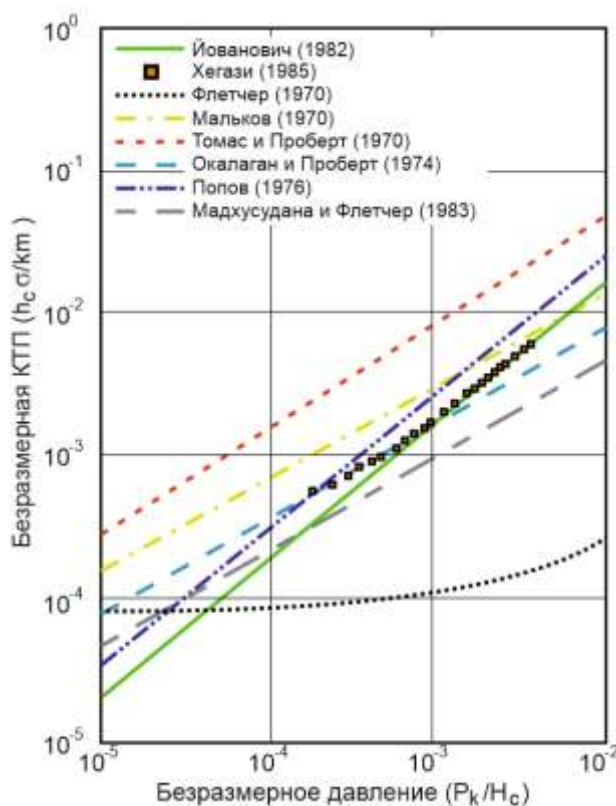


Рис.2.3. Отображение результата расчетов по существующим методикам (линии) и результата эксперимента (квадраты) для контакта SS-304 - SS-304 с эквивалентной шероховатостью  $Ra = 10.95$  мкм

В [248] представлена полуэмпирическая модель (2.2) включающая механизм передачи через фактические места контакта и межконтактного зазора. Применима для материалов: сталь, латунь и алюминий с отшлифованными поверхностями. Модель апробирована с межконтактными средами: воздух, веретенное масло, глицерин.

$$\frac{h_{c+\epsilon}\sigma}{km} = \frac{k_f\sigma}{\lambda km} + \frac{\sigma\alpha_s}{mb_s^2 \tan^{-1}\left(\frac{b_s}{\alpha_s} \sqrt{\left(1 - \frac{k_f}{h_{c+\epsilon}\lambda} - 1\right)}\right)}$$

$$\lambda = 0.61(\sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA}) \quad (2.2)$$

$$b_s = 0.0048(TIR_1 + TIR_2) \times \left[\left(P_{mx}^{1/3} \times P^{2/3}\right)/H_M\right]^{1/2}$$

$$b_s = 0.0048(TIR_1 + TIR_2) \times [P/H_M]^{1/2}$$

$$P_{mx} \approx 10MPa$$

В [249, 250] представлена полуэмпирическая модель (2.3), включающая механизм передачи тепла через фактические места контакта и межконтактного зазора. Применима для материалов: сталь Армко, алюминий с отшлифованными поверхностями. Исследовалась с межконтактными средами: воздух, вода, ртуть

$$\frac{h_{c+g,s}\sigma}{km} = \frac{\frac{k_f\sigma}{km} \left[ \left(1 - \frac{\alpha_s^2}{b_s^2}\right) C_1 + 1.1 \frac{\alpha_s}{b_s} \psi\left(\frac{\alpha_s}{b_s}\right) \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right) \right] + 4.26 \frac{\alpha_s}{b_s} \sigma \sqrt{\mu}}{(\lambda_1 + \lambda_2) \left(1 - \frac{\alpha_s^2}{b_s^2}\right) \left[1 - \frac{k_f}{\lambda_1 + \lambda_2} \left(\frac{\lambda_1}{k_1} + \frac{\lambda_2}{k_2}\right)\right] C_1}$$

$$C_1 = \frac{4.26\sqrt{\mu\lambda_1}b_s}{k_1\alpha_s} + \frac{1}{k_1} + \frac{4.26\sqrt{\mu\lambda_2}b_s}{k_2\alpha_s} + \frac{1}{k_2} \quad (2.3)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{(V/A_c)}{\left(1 - k_f/k_{1,2}\right)}; \quad k_f \neq k_{1,2}$$

В [251] представлена полуэмпирическая модель (2.4), включающая механизм передачи тепла через фактические места контакта и межконтактного зазора. Применима для материалов: сталь, латунь и алюминий после

механической обработки. Рассматривалась на материалах с шероховатостями  $Ra = 4,3..5,1$ . Исследовалась с межконтактными средами: воздух, вода, глицерин.

$$\frac{h_{c+g,s}\sigma}{km} = \frac{\sigma k_f}{km\lambda} + \frac{2\sigma}{m\psi(\alpha_s/b_s)} \sqrt{\frac{P \sin \theta}{\pi \omega_1 \omega_2 H_M}} \quad (2.4)$$

$$\lambda = 4/9 \times (\sigma_{1,max} + \sigma_{2,max})$$

$$\psi(\alpha_s/b_s) = 1,$$

В [252] представлена полуэмпирическая модель (2.5), включающая механизм передачи тепла через фактические места контакта и межконтактного зазора. Апробирована для материалов: оружейный металл. Исследовалась с межконтактными средами: воздух, масло, парафин.

$$\frac{h_{c+g}\sigma}{km} = \frac{\sigma P}{m[(\lambda_1 + \lambda_2)/2 + \lambda_{azide}]C_1 H_B} + \frac{2\sigma k_f}{km(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (2.5)$$

В [253] представлена полуэмпирическая модель (2.6), включающая механизм передачи через фактические места контакта. Применима для материалов: сталь, медь, алюминий, никель и уран.

$$h_c \sigma / km = 2.1 \times 10^4 (\sigma / m) (P / 3S_U) \quad (2.6)$$

В [254] представлена полуэмпирическая модель (2.7), включающая механизм передачи через фактические места контакта. Применима для материалов: Алюминий, уран, железо, магний, сталь, дюралюминий и ниобий.

$$h_c \sigma / km = 8.0 \times 10^3 (\sigma / m) (C_1 P / 3S_U)^{0.86}$$

$$C_1 = 1 \text{ для } \sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA} \geq 30\mu t$$

$$C_1 = [30 / (\sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA})]^{1/3} \quad (2.7)$$

$$\text{для } 10\mu t < \sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA} < 30\mu t$$

$$C_1 = 15 / (\sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA}) \text{ для } \sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA} \leq 10\mu t$$

В [255] представлена полуэмпирическая модель (2.8), включающая механизм передачи через фактические места контакта и межконтактного зазора. Применима для материалов: сталь, латунь и алюминий. Рассматривалась на

материалах с шероховатостями  $Ra = 4,3..5,1$ . Исследовалась с межконтактными средами: воздух, вода и глицерин.

$$\frac{h_{c+g,s}\sigma}{km} = \frac{\sigma k_f}{mk\lambda} + \frac{\sigma C_1 \sqrt{P/H_M}}{m\lambda \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{1}{P/H_M} - \frac{k_f}{h_{c+g,s}\lambda P/H_M}} - 1 \right)} \quad (2.8)$$

В [256] представлена полуэмпирическая модель (2.9), построенная для номинально плоской и шероховатых поверхностей.

$$h_{cs}\sigma/km = 0.69(P/3S_U)^{0.85} \quad (2.9)$$

В [257] представлена эмпирическая модель (2.10), построенная на 400 измерениях для алюминия, нержавеющей стали, латуни и магния с относительной погрешностью 24%. Параметр  $b_L = 12.7$  мм

$$h_{cs+L}\sigma/km = \left( \sqrt{\pi\sigma/m\lambda} \right) [3.8 \times 10^{-6}(\lambda_{P=0}/b_L) + 0.026(P/E)BT]^{0.56} \quad (2.10)$$

$$\lambda = \lambda_{P=0} \times \exp(-180 \times PBTb/E\lambda_{P=0})$$

$$\lambda_{P=0} = [TIR_{rgh} + 2\sigma_{rgh} - 0.5(TIR_{smth} + 2\sigma_{smth})]$$

В [258] представлена полуэмпирическая модель (2.11), построенная на 92-х измерениях для  $a_s = 40$  мкм. Мех. обработка: точение, шлифовка. Рассматривалась пара нержавеющей сталь – молибден.

$$h_{cs}\sigma/km = 2.95 \times 10^3(\sigma/m)(C_1 P/3S_t)^{0.66}$$

$$C_1 = 1 \text{ для } \sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA} \geq 30\mu m$$

$$C_1 = [30/(\sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA})]^{1/3} \quad (2.11)$$

для  $10\mu m < \sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA} < 30\mu m$

$$C_1 = 15/(\sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA}) \text{ для } \sigma_{1,CLA} + \sigma_{2,CLA} \leq 10\mu m$$

В [259, 260] представлена эмпирическая модель (2.12), построенная на 102 измерениях для стали и 240 для алюминия. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый.

$$h_{c,s}\sigma/km = 3.73(\sigma^2/Am)(L/\sigma^2H)^{0.66}$$

$$h_{cs}\sigma/km = C_1(\sigma^2/Am)(L/\sigma^2H)^{C_2} \quad (2.12)$$

$C_1 = 9.5, C_2 = 0.74$ ; нержавеющая сталь

$C_1 = 1.9, C_2 = 0.72$ ; алюминиевые сплавы

В [261] представлена эмпирическая модель (2.13), построенная на 80 измерениях для различных материалов. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый. Параметр  $a_s = 30$  мм.

$$h_{c,s}\sigma/km = 2.7 \times 10^3(\sigma/m)(C_1 P/3S_U)^{0.956}$$

$$C_1 = 12/(\sigma_{1,max} + \sigma_{2,max}) \text{ для } 1\mu m \leq \sigma_{1,max} + \sigma_{2,max} < 5\mu m$$

$$C_1 = [20/(\sigma_{1,max} + \sigma_{2,max})]^{0.63} \quad (2.13)$$

$$\text{для } 5\mu m \leq \sigma_{1,max} + \sigma_{2,max} < 10\mu m$$

$$C_1 = [30/(\sigma_{1,max} + \sigma_{2,max})]^{0.4}$$

$$\text{для } 10\mu m \leq \sigma_{1,max} + \sigma_{2,max} \leq 30\mu m$$

В [262] представлена эмпирическая модель (2.14), построенная на 78 измерениях для пары Zr-2/UO<sub>2</sub>.

$$h_{c,s}\sigma/km = 12.29 \times 10^{-3}(1/m)(P/H)^{0.66} \quad (2.14)$$

В [263] представлена эмпирическая модель (2.15), построенная с использованием коэффициента корреляции микротвердости. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый.

$$h_{c,s}\sigma/km = 44.6(\sigma/m)^{0.25}(P/c_1)^{0.97} \quad (2.15)$$

В [264] представлена теоретическая модель (2.16) упругой деформации. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый.

$$\frac{h_{c,s}\sigma}{km} = \sqrt{2} \frac{\sigma}{m} \frac{\eta \sqrt{\operatorname{erfc}\left(u^*/\sqrt{2}\right)} \sigma \beta I_1(u^*)}{[1 - \sqrt{\eta \pi \sigma \beta I_1(u^*)}]^{1.5}} \quad (2.16)$$



$$h_{c,s}\sigma/km = C_1 \left( \sqrt{2P/E'm} \right)^{0.95}$$

$$C_1 = 1.87, \alpha = 15; C_1 = 1.75, \alpha = 5$$

В [265] представлена теоретическая модель (2.17) упругой деформации, построенная с использованием преобразования Уайтхауса и Арчард. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый.

$$\frac{h_{c,s}\sigma}{km} = \frac{2}{5\Delta x} \frac{\sigma}{m} \frac{\sqrt{I_{Qd}(u^*)I_{1,1}(u^*)}}{\left[1 - \sqrt{0.2\pi I_{1,1}(u^*)}\right]^{1.5}}$$

$$h_{c,s}\sigma/km = C_1 \left( \sqrt{2P/E'm} \right)^{0.97} \quad (2.17)$$

$$C_1 = 2.80, \alpha = 60; C_1 = 2.38, \alpha = 4$$

В [185] представлена теоретическая модель (2.18) упругой деформации, основанная на работах Купера и др. Соотношение площадей  $S_{el} = 0,5S_{pl}$ . Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый.

$$\frac{h_{c,s}\sigma}{km} = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \frac{\exp(-u^{*2}/2)}{\left[1 - \sqrt{0.25 \operatorname{erfc}(u^*/\sqrt{2})}\right]^{1.5}}$$

$$h_{c,s}\sigma/km = 1.55 \left( \sqrt{2P/E'm} \right)^{0.94} \quad (2.18)$$

В [266] представлена теоретическая модель (2.18) упругой деформации для параметра  $u^* = 2,0$ . Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый.

$$\frac{h_{c,s}\sigma}{km} = \frac{1}{(2\pi)^{5/4}} \frac{\exp(-u^{*2}/2)/\sqrt{u^*}}{\left[1 - \sqrt{\frac{\exp(-u^{*2}/2)}{2\sqrt{2\pi}u^*}}\right]^{1.5}}$$

$$h_{c,s}\sigma/km = 0.799 \left( \sqrt{2P/E'm} \right)^{0.98} \quad (2.19)$$

[267] представлена теоретическая модель (2.20) упругой деформации – переработанная модель Сэйлза и Томаса. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый.

$$h_{c,s}\sigma/km = (2C_2/mC_1)(\sigma/\beta)^{(1-C_3)^2}(P/E)^{C_3} \quad (2.20)$$

В [268] представлена теоретическая модель (2.21) упругой деформации. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый.

$$h_{c,s}\sigma/km = 0.9(P/H_v)^{0.941} \quad (2.21)$$

В [264] представлена теоретическая модель (2.22) пластической деформации. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый

$$\frac{h_{c,s}\sigma}{km} = 2 \frac{\sigma}{m} \frac{\eta \sqrt{\operatorname{erfc}(u^*/\sqrt{2})} \sigma \beta I_1(u^*)}{[1 - \sqrt{\eta 2 \pi \sigma \beta I_1(u^*)}]^{1.5}} \quad (2.22)$$

$$h_{c,s}\sigma/km = C_1(P/H_v)^{0.98}$$

$$C_1 = 1.91, \alpha = 15; C_1 = 1.51, \alpha = 5$$

В [17] представлена теоретическая модель (2.23), основанная на предположении, что высот на поверхностях распределяются по закону Гауса. Определяется безразмерная контактная проводимость, соответствующая шероховатым поверхностям, которые считаются плоскими.

$$\frac{h_{c,s}\sigma}{km} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-u^{*2}/2)}{\left[1 - \sqrt{0.5 \operatorname{erfc}(u^*/\sqrt{2})}\right]^{1.5}} \quad (2.23)$$

$$h_{c,s}\sigma/km = 1.45(P/H_c)^{0.985}$$

В [269] представлена теоретическая модель (2.24) пластической деформации, основанная на работах Купера и др. Микрорельеф поверхности: номинально плоский и шероховатый

$$\frac{h_{c,s}\sigma}{km} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-u^{*2}/2)}{\left[1 - \sqrt{0.5 \operatorname{erfc}(u^*/\sqrt{2})}\right]^{1.5}} \quad (2.24)$$

$$h_{c,s}\sigma/km = 1.25(P/H_c)^{0.95}$$

В [270] представлена полуэмпирическая модель (2.25), построенная для сферических и относительно гладких поверхностей с учетом как упругой, так и пластической деформаций посредством коэффициента. Исследуемые материалы: нержавеющая сталь, латунь, алюминий, магний. Параметр  $b_L = 12.7$  мм.

$$\begin{aligned}\frac{h_{cl}b_L}{k} &= \frac{2a_{LH}/b_L}{\pi\psi(a_{LH}/b_L)} = \frac{2 \times 1.285\chi^{1/3}}{\pi\psi(1.285\chi^{1/3})} \\ \frac{h_{cs}\sigma}{km} &= \frac{\sigma}{m\pi} \frac{2L/\pi\alpha_{LH}^2}{C_1H} = \frac{1}{\alpha_s\psi(a_s/b_s)} \\ \frac{R_{cl}}{R_{cs}} &= \frac{L/\pi\alpha_{LH}^2}{C_1H} \frac{\psi(1.285\chi^{1/3})}{1.285\chi^{1/3}} \frac{b_L}{\alpha_s\psi(a_s/b_s)}\end{aligned}\quad (2.25)$$

В [268] представлена теоретическая модель (2.26), построенная для сферических и относительно гладких поверхностей с учетом как упругой, так и пластической деформаций. Требуется итеративного решения для  $u^*$  и  $a_L$ .

$$\begin{aligned}\frac{h_{cl}b_L}{k} &= \frac{2a_l/b_L}{\pi\psi(a_{LH}/b_L)} = \frac{2}{\pi} \frac{\varepsilon_L}{\psi(\varepsilon_L)} = \frac{2 \times 1.285\chi^{1/3}}{\pi\psi(1.285\chi^{1/3})} \\ \varepsilon_L^2 &= \varepsilon_{L,H_z}^2 + 2 \int_{\varepsilon_{L,H_z}}^1 \exp\left[-\frac{\delta}{\sigma} \varepsilon_{L,H_z}^2 C_1 \left(2u^* + \frac{\delta}{\sigma} \varepsilon_{L,H_z}^2 C_1\right)\right] \varepsilon_L d\varepsilon_L \\ C_1 &= \frac{\varepsilon_L^2}{\varepsilon_{L,H_z}^2} - 2 \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \left[ \left(2 - \frac{\varepsilon_L^2}{\varepsilon_{L,H_z}^2}\right) \sin^{-1}\left(\frac{\varepsilon_{L,H_z}}{\varepsilon_L}\right) + \sqrt{\frac{\varepsilon_L^2}{\varepsilon_{L,H_z}^2} - 1} \right] \right\} \\ h_{c,s}\sigma/km &= 0.9(P/H)^{0.941} \\ h_{c,s}\sigma/mk &= 0.9(P/H_v)^{0.941}\end{aligned}\quad (2.26)$$

В [271] представлена теоретическая модель (2.27, 2.28) использующая модель Купера [162]. Требуется задание  $P(r)$  и  $P(x)$ .

Для осесимметричного распределения давления  $P(r)$ :

$$\frac{h_{c,s}\sigma}{km} = 2.90 \int_0^1 \frac{r}{b_L} \left(\frac{P}{H}\right)^{0.985} d\left(\frac{r}{b_L}\right)$$

$$\frac{h_{c,l}b_L}{k} = \frac{1}{8} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[ \int_0^1 \frac{r}{b_L} \left(\frac{P}{P_{av}}\right)^{0.985} J_0\left(\zeta_n \frac{r}{b_L}\right) d\left(\frac{r}{b_L}\right) \right]^2}{\zeta_n J_0^2(\zeta_n)} \right\}^{-1} \quad (2.27)$$

Для однонаправленного распределения давления  $P(x)$ :

$$\frac{h_c\sigma}{km} = 1.45 \int_0^{\infty} \left(\frac{P}{H}\right)^{0.985} d\left(\frac{x}{b_L}\right)$$

$$\frac{h_c b_L}{k} = \frac{1}{4} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \int_0^{\infty} \left(\frac{P}{P_{av}}\right)^{0.985} \cos\left(\frac{n\pi x}{b_L}\right) d\left(\frac{x}{b_L}\right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (2.28)$$

В [272] представлена теоретическая модель (2.29), построенная для номинально плоских шероховатых поверхностей. Требуется итеративное решение для  $P(r)$  и  $w(r)$ .

$$\frac{P(r)}{P_0} = \frac{H_V}{2P_0} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\frac{w(r)E}{t_{plate}P_0} + \frac{w(0)E}{t_{plate}P_0}}{\sqrt{2\sigma E}} \right] \quad (2.29)$$

$$\frac{h_{cL}(r)t_{plate}}{k} = \frac{1.45Em}{H_V} \frac{P(r)t_{plate}}{\sigma E}$$

В [273] представлена полуэмпирическая модель (2.30), построенная для сферических и относительно гладких поверхностей с учетом как упругой, так и пластической деформаций. Верифицирована на поверхностях из нержавеющей стали с параметром  $a_L = 0.5$  мм.

$$H^* = \pi H \left[ \frac{9}{16} (\rho^2 / E^{12} L) \right]^{1/3}$$

$$\sigma^* = \pi \sigma \left[ \frac{3}{4} (\rho E^{12} / L^2) \right]^{1/3} \quad (2.30)$$

$$m^* = mE^1 / H$$

$$\frac{h_c b_L}{k} = \frac{\frac{b_L}{a_{LHE}} \frac{\pi^2}{4} (\sum_{i=1}^N C_{1,i}^2)^2}{\sum_{i=1}^N C_{1,i} \left( \frac{4}{3} C_{1,i}^2 + \sum_{j \neq i}^N C_{1,j}^N \sum_{k=1}^N C_{2k} C_{3ij} \right)}$$

В [274] представлена полуэмпирическая модель (2.31), построенная для сферических и относительно гладких поверхностей с учетом как упругой, так и пластической деформаций. Требуется итеративное решение для  $P^*(r^*)$  и  $w^*(r^*)$  и взятия эллиптического интеграла  $K$ .

$$u^*(r^*) = u(r)/\sigma u = u_d \sigma w^*(r^*) = w(r)/\sigma w = w_d \sigma$$

$$r^* = \frac{r}{\sqrt{2\rho\sigma}} P^* = \frac{P}{E' \sqrt{\sigma/8\rho}} L^* = \frac{2L}{\sigma E' \sqrt{2\rho\sigma}}$$

$$u^*(r^*) = u_z + r^* 2 + w^*(r^*) - w_0$$

$$P^*(r^*) = \left( \frac{8}{3} \eta \sigma \sqrt{2\rho\beta} \right) \int_{u^*}^{\infty} (z^* - u^*)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^{*2}}{2}\right) dz^* \quad (2.31)$$

$$w^*(r^*) = \int_0^{\infty} r^* P^*(r^* \xi) k(\xi) d\xi \quad (r^* > 0)$$

$$w_0^* = \int_0^{\infty} P^*(\xi) d\xi \quad (r^* = 0)$$

$$k(\xi) = (2/\pi)K(\xi) \text{ для } \xi < 1 \text{ и } k(\xi) = (2/\pi)K(1/\xi) \text{ для } \xi > 1$$

В [275] представлена полуэмпирическая модель (2.32), построенная для сферических и относительно гладких поверхностей с учетом как упругой, так и пластической деформаций. Параметры  $P_0$  и  $a_L$  определялись из эксперимента с образцами из стали. Модель соответствует переработанной модели Нишино и др. [274].

$$P(r) = \frac{P_0}{P_{QHL}} \frac{1}{\pi} \left( \frac{3LE_1}{2(1-v_1^2)\rho^2} \right)^{v_3} \left( 1 - \left\{ \frac{r}{\frac{a_L}{a_{L,H_z}} \left[ \frac{3(1-v_1^2)L_\rho}{2E_1} \right]^{1/3}} \right\} \right)^\gamma \quad (2.32)$$

$$\gamma = \frac{3}{2} \frac{P_0}{P_{QHL}} \left( \frac{a_L}{a_{L/V}} \right)^2 - 1$$

В [277] представлена теоретическая модель (2.33), построенная для сферических/круглых шероховатых поверхностей

$$TCR = \frac{H'}{1.57k_s F} \left( \frac{\sigma}{m} \right) + \frac{(1 - a_L/b_L)^{1.5}}{2K_s a_L} \quad (2.33)$$

В [278] представлена теоретическая модель (2.34), применимая только для плоских контактов

$$h_c = 4200K_s R_a^{-0.257} \left( \frac{P}{H} \right)^{0.95} \quad (2.34)$$

В [279] представлена теоретическая модель (2.35), предназначенная для использования при низких температурах. Модель построена при исследовании контактов нержавеющей стали марки 304.

$$TCR = \frac{1}{r_j} = \frac{(1 - \gamma)}{r_c} + \frac{\gamma}{r_b} \quad (2.35)$$

В [280] представлена теоретическая модель (2.36), построенная для точных и фрезерованных поверхностей

$$r_j = 1.53 \left( \sigma / k_g \right) \left( P / H_c \right)^{-0.097} \quad (2.36)$$

В [172] представлена полуэмпирическая модель (2.37), построенная для одномерного стационарного случая. Исследован контакт Ti-6Al-4 V – Ti-6Al-4 V со смазочным маслом

$$TCR = 28740,3 \cdot \left( \frac{\bar{T}}{294} \right)^{0,493} \cdot \left( \frac{P}{E_0} \right)^{0,330} \quad (2.37)$$

В [281] представлена теоретическая модель (2.38), основанная на численном расчёте. Исследован контакт Ti-6Al-4 V – Ti-6Al-4 V и C/C-SiC в присутствии межконтактной среды. Дополнительное сопротивление между средой и поверхностью не учитывается

$$\text{ANSYS } TCR = \Delta T / q \quad (2.38)$$

В [282] представлена полуэмпирическая модель (2.39), построенная для полимеров из ABS и PP. Модель начинает расходиться с экспериментальными данными при шероховатости формы  $R_a$ , равной 1 мкм. Это позволяет предположить, что она может быть неэффективной для форм с более высокой шероховатостью

$$\frac{1}{TCR} = \frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_f}$$

$$\frac{1}{r_f(t)} = \frac{k_f}{Y(t)} \quad (2.39)$$

$$\frac{1}{r_c} = 2\lambda_m n_m \frac{a_m}{\psi}$$

В [283] представлена теоретическая модель (2.40), основанная на решении обратной задачи прогнозирования значения КТС. Решение, по-видимому, хорошо работает для контактов "плоская поверхность-плоская поверхность" и "цилиндр-цилиндр". Однако для контактов "плоский цилиндр" наблюдается небольшое увеличение погрешности.

$$S[R_c(t)] = \int_{t=0}^T \left[ \sum_{j=1}^{N_1} (T_{1j} + Y_{1j})^2 \right] dt$$

$$+ \int_{t=0}^T \left[ \sum_{j=1}^{N_2} (T_{2j} + Y_{2j})^2 \right] dt \quad (2.40)$$

В [284] представлена теоретическая модель (2.41), используемая для оценки теплового контакта в процессах обработки металлов давлением. В условиях, когда тепло выделяется в результате трения и его интенсивность зависит от величины зазора и контактного давления, необходимо тщательно измерить эти параметры:

$$h_{int}(p_n, g_n) = \begin{cases} h_{med} + (h_{sup} - h_{med})(1 - e^{m_1 p_n}), & p_n < 0, g_n = 0 \\ h_{inf} + (h_{inf} - h_{med})(1 - e^{-m_2 g_n}), & g_n \geq 0, p_n = 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

В [183] представлена теоретическая модель (2.42), построенная для различных масштабов контакта с учетом как упругой, упруго-пластической так и пластической деформаций

$$TCC = \int_0^{a_{c2}} h_{cp} n(a) da + \int_{a_{c2}}^{a_{c1}} h_{cep} n(a) da + \int_{a_{c1}}^{a_1} h_{ep} n(a) da \quad (2.42)$$

В [190] представлена полуэмпирическая модель (2.43), построенная для давления не выше 7 МПа с учётом как упругой, упруго-пластической так и пластической деформаций

$$h_{ep}(a') = \frac{\lambda a' \sqrt{1 - f(a')}}{d' \sqrt{1 - f(a')} + \left[ 1 - \sqrt{\frac{1 + f(a')}{2}} \right]^{3/2} \sqrt{\frac{\pi a'}{2}}} \quad (2.43)$$

В [285] представлена полуэмпирическая модель (2.44), построенная для элементов машин. Погрешности модели относительно заданных параметров составили 8,75% и 5,03%.

$$TCC = h_{asp} + h_{tim}$$

$$h_{tim} = C_{wet} \frac{k_{tim}}{d_{tim}} \quad (2.44)$$

$$h_{asp} = \frac{\int_{a_s}^{a_c} \frac{n(a)}{R_p(a)} da + \int_{a_c}^{a_l} \frac{n(a)}{R_e(a)} da}{A_a}$$

В [286] представлена теоретическая модель (2.45), построенная для поверхностей с коническими роликами или канавками. Модель не учитывает влияние излучения и конвекции. Кроме того, она не подходит для поверхностей с анизотропией.

$$TCC = \left( \frac{1}{A_a R_c}, \text{внутр. контант} \right) + \left( \frac{1}{A_a R_c}, \text{внешн. контант} \right) \quad (2.45)$$



В [287] представлена теоретическая модель (2.46), применяемая для расчётов КТС между топливной таблеткой и оболочкой из циркониевого сплава, которая окружает ядерный топливный стержень

$$h_s = \frac{\lambda}{0.05\sqrt{0.5(\xi_1^2 + \xi_2^2)}} \left(\frac{P}{H}\right) \quad (2.46)$$

В [152] представлена теоретическая модель (2.47), построенная для поверхности Гаусса с учётом лишь пластической деформации

$$h_s = 1.45 \left(\frac{\lambda m}{\sigma}\right) \left(\frac{P}{H}\right)^{0.985} \quad (2.47)$$

В [288] представлена полуэмпирическая модель (2.48) пластической и упругой деформации, которая несколько завышает значения КТС для высоких сжимающих давлений

$$h_s = 1.13 \left(\frac{\lambda \tan \theta}{\sigma}\right) \left(\frac{P}{H}\right)^{0.94}, \text{ пластическая деформация} \quad (2.48)$$

$$h_s = 1.55 \left(\frac{\lambda \tan \theta}{\sigma}\right) \left(\frac{P\sqrt{2}}{E' \tan \theta}\right)^{0.94}, \text{ упругая деформация}$$

В [289] представлена полуэмпирическая модель (2.49), построенная для  $2 < d/\sigma < 4.75$  с относительной погрешностью  $\pm 1.5\%$ .

$$h_s = 1.25 \left(\frac{\lambda m}{\sigma}\right) \left(\frac{P}{H_{mic}}\right)^{0.95} \quad (2.49)$$

В [290] представлена теоретическая модель (2.50), основанная на фрактальной поверхности

$$h_s = \frac{L^D}{f(R'/\rho)C} \left(\frac{(2-D)A_t^*}{D}\right)^{D/2} \quad (2.50)$$

В [291] представлена полуэмпирическая модель (2.51), используемая для расчёта КТС несоответствующих шероховатых контактов и соответствующих шероховато-гладких контактов Герца

$$h_s = \frac{2}{\pi c} \lambda \left( \frac{m}{\sigma} \right) \left( \frac{P}{H^*} \right)^{0.94} \quad (2.51)$$

В [292] представлена полуэмпирическая модель (2.52) для низких температур, построенная по данным для нержавеющей стали марки 304. Хорошо согласуется с экспериментом для температуры 110-150 К и давлений 1-7 МПа.

$$h_s = \frac{\Phi_2 \lambda m}{2\pi \psi \sigma} \exp \left\{ - \left[ \operatorname{erfc}^{-1} \left( \frac{2P}{\Phi_1(P+H)} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.52)$$

В [293] представлена теоретическая модель (2.53), построенная с использованием W-М функции для восстановления шероховатых поверхностей. Учитывается как упругая, упруго-пластическая, так и полностью пластическая деформации. Также учитывается тепловое расширение и тепловая упругость.

$$h_s = \int_{a'_{C1}}^{a'_L} h_e(a') n(a') da' + \int_{a'_{C2}}^{a'_{C1}} h_{ep}(a') n(a') da' + \int_{a'_S}^{a'_{C2}} h_p(a') n(a') da',$$

для  $a'_{C1} < a'_L$

(2.53)

$$h_s = \int_{a'_{C2}}^{a'_L} h_{ep}(a') n(a') da' + \int_{a'_S}^{a'_{C2}} h_p(a') n(a') da', \text{ для } a'_{C2} < a'_L$$

$< a'_{C1}$

$$h_s = \int_{a'_S}^{a'_L} h_p(a') n(a') da', \text{ для } 0 < a'_L < a'_{C2}$$

В [294] представлена теоретическая модель (2.54), основанная на фрактальных поверхностях.

$$h_s = \frac{\int_{a_s}^{a_c} \frac{n(a)}{R_p} da + \int_{a_c}^{a_l} \frac{n(a)}{R_e} da}{A_a} \quad (2.54)$$

В некоторых публикациях [295-298] содержатся только экспериментальные сведения термической проводимости в контактах перспективных материалов: слоистых, пористых, композиционных. Описываются результаты исследований

контактных переходов металл-полупроводник [299], алюминий-кремний [300], [301] и полупроводник-полупроводник [302]. Приводятся значения контактного термического сопротивления для углерод – углеродных композитов в области низких температур [303] и показывается, что, несмотря на высокую теплопроводность таких материалов, термическое сопротивление в их контактах на два порядка больше, чем у пары медь – медь.

Отмеченные публикации позволяют сделать вывод, что за последнее время проведен значительный объем экспериментальных и теоретических работ процессов образования термического (или электрического) сопротивления в зависимости от различных факторов, среди которых необходимо выделить природу материала контактирующих тел, среду между поверхностями соприкосновения, температурные условия, усилия прижима поверхностей и др. Вместе с тем остаются малоизученными целый ряд вопросов, связанных с прогнозированием процессов контактного теплообмена.

Отмеченное позволяет сделать вывод, что к настоящему времени предложено значительное количество методик по моделированию и прогнозированию КТС. Для оценки потерь температурного напора, КТС определяется по эмпирическим формулам, но их многообразие, неполно приведенные условия получения экспериментальных данных, на основе которых эти зависимости были получены, вызывают сомнение в правильности выбора того или иного соотношения, а различия в абсолютных значениях контактного термического сопротивления для одних и тех же условий затрудняют их использование. Многие из зависимостей по контактному теплообмену получены для специфических условий контактирования, а материалы, используемые при проектировании термонагруженных конструкций, имеют достаточно специфические свойства и изучены в узком диапазоне изменяемых параметров состояния. Таким образом, большинство зависимостей становятся неприменимы для целого ряда задач инженерной практики.

## Выводы по Главе 2

Вторая глава диссертации представляет собой систематизированный обзор существующих подходов к расчёту контактной термической проводимости и контактного термического сопротивления (КТС), подчёркивая сложный, междисциплинарный характер проблемы, в которой переплетаются геометрические, механические и тепловые аспекты. Анализ показывает, что полная термическая проводимость контакта складывается из трёх основных составляющих: теплопроводности через фактические площади контакта микронеровностей, теплопроводности межконтактной среды (например, воздуха или смазки) и радиационного теплообмена. Однако получение точного аналитического выражения для КТС остаётся затруднительным по ряду причин: во-первых, из-за высокой сложности адекватного описания микрорельефа реальных поверхностей, который варьируется от макронеровностей до наноуровня и зависит от технологии изготовления и свойств материалов; во-вторых, из-за трудностей в моделировании контактной деформации, которая может быть упругой, пластической, упругопластической, а также зависеть от температуры и времени (ползучесть); в-третьих, из-за тесной термомеханической связи — ошибки в оценке реальной площади контакта напрямую приводят к существенным погрешностям в расчёте теплового сопротивления.

Исторически, многие модели КТС были разработаны по аналогии с электрическим контактом, в частности на основе работ Р. Хольма, однако перенос таких подходов на тепловые задачи имеет существенные ограничения: диапазон изменения теплопроводности материалов значительно уже, чем электропроводности, а процессы распространения тепла принципиально сложнее для управления. В литературе выделяются несколько ключевых направлений исследований: от анализа сопротивления единичного микроконтакта (например, сфера–плоскость) до моделирования многоточечного контакта с учётом статистических или фрактальных характеристик поверхности. Значительное внимание уделяется влиянию типа деформации: от упругой (модели на основе теории Герца) до упругопластической и чисто пластической, при этом для расчёта

реальной площади контакта используются как классические подходы (Гринвуд–Уильямсон), так и современные фрактальные модели (Вейерштрасса–Мандельброта). Отмечается, что фрактальные методы, несмотря на свою теоретическую привлекательность, могут давать заниженные значения пластической деформации при высоких нагрузках, что стимулирует развитие многомасштабных моделей. Кроме того, рассматриваются эффекты, связанные с наличием межконтактной среды (воздух, масло, оксидные плёнки), влиянием волнистости и макронеровностей, которые особенно значимы при малых контактных давлениях, а также подходы к учёту анизотропии поверхности и взаимной ориентации контактирующих деталей.

Особое место занимают численные методы, включая конечно-элементное моделирование и статистические подходы вроде метода Монте-Карло, позволяющие более точно воспроизводить микрогеометрию контакта. Вместе с тем, подавляющее большинство существующих моделей либо чисто теоретические (и сильно идеализированные), либо полуэмпирические, полученные на основе ограниченных экспериментальных данных — чаще всего для пар материалов типа сталь–алюминий при шлифованной обработке поверхности и узком диапазоне давлений.

Приведён подробный перечень аналитических и полуэмпирических зависимостей для расчёта КТС, включающий более 50 формул, каждая из которых имеет свои условия применимости: определённые материалы, тип обработки поверхности, диапазон давлений, температур и межконтактных сред. Многие модели не учитывают радиационный или конвективный теплообмен, предполагают изотропность и отсутствие загрязнений, а также не охватывают современные материалы — композиты, пористые структуры, слоистые системы, которые всё чаще применяются в аэрокосмической, ядерной и электронной промышленности. Даже при схожих условиях разные модели могут давать расхождения в значениях КТС на порядки, что затрудняет их практическое использование в инженерных расчётах.

Таким образом, несмотря на значительный объём накопленных теоретических и экспериментальных данных, проблема надёжного прогнозирования контактного термического сопротивления остаётся актуальной. Существующие подходы фрагментарны, узкоспециализированы и часто не обеспечивают достаточной точности при переходе за пределы условий, в которых они были получены. Это обосновывает необходимость разработки более универсальной, физически обоснованной методики расчёта КТС, способной учитывать реальную микрогеометрию поверхности, термомеханическую связь, разнообразие материалов и эксплуатационных условий — задача, которая и определяет научную новизну и практическую значимость настоящей диссертационной работы.

## **ГЛАВА 3. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОРЕЛЬЕФА КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

### **3.1. Существующие подходы к моделированию микрорельефа контактирующих поверхностей**

Существующие теоретические исследования теплопроводности контакта основаны на механике упругости и механике пластической деформации. Когда две реальные поверхности находятся в контакте, прямые контакты между твердыми пятнами происходят только в отдельных частях поверхности [304]. Авторами [305] проведено широкое исследование теплопроводности контактных пар из нержавеющей стали функционирующих в условиях низких температур. Ими отмечено, что теплопроводность контакта уменьшается с увеличением шероховатости поверхности, как и ожидалось.

Форма неровностей влияет на деформацию пятен контакта. Например, неровности в виде конуса деформируются более явно, чем неровности в виде цилиндра, а неровности в виде конуса с большим уклоном деформируются более явно, чем неровности в виде конуса с меньшим уклоном. Реальные неровности имеют неправильную форму и обычно рассматриваются при измерении шероховатости поверхности как конуса.

Рассматривая аспекты прогнозной оценки величин КТС, необходимо в первую очередь подчеркнуть, что состояние шероховатости поверхности и достоверное её представление в прочностных и тепловых расчетах во многом определяет в дальнейшем эксплуатационные свойства деталей конструкций.

Традиционно микрорельеф контактирующих поверхностей деталей машин рассматривался как случайный процесс. Одним из первых, кто использовал подобный подход был Гринвуд, в котором автор проанализировал упругий контакт двух шероховатых поверхностей, рассматривая плоскую поверхность в нормальном контакте с шероховатой поверхностью, состоящей из сферических неровностей постоянного радиуса, равного среднему радиусу кривизны исходных поверхностей.

Развитие теории контакта реальных поверхностей началось при использовании дискретной модели шероховатости [290-293, 305-309], отличительной чертой которой являются параметры распределения, определяемых экспериментально в результате обработки профилограммы.

Одним из определяющих факторов, при расчете КТС является шероховатость поверхности. Одним из сложнейших вопросов контактного теплообмена является перенос решений единичной модели на реальные поверхности. Из литературных данных известно, что при переходе к номинально плоским поверхностям основополагающими факторами являются не только число и размер контактных пятен, но и вид деформации. Большинство этих вопросов рассматривается в области трибологии. Было бы логичным применить знания, полученные исследователями в трибологии на явление контактного теплообмена.

В большинстве случаев, микротопография поверхности контакта моделировалась аналитически, с применением различного вида допущений и упрощений [305, 309-316]. Микрорельеф моделировался в виде различных геометрических форм, когда поведение одной контактирующей пары микровыступов переносилось на описание поведения пар всех взаимодействующих поверхностей. Моделирование контакта микронеровностей взаимодействующих поверхностей на базе одиночного соединения сферических или конических выступов не принесло качественно новых решений. Большинство этих предположений были сделаны в 1950-х и 70-х годах, когда других подходов к моделированию, как например моделирование на ЭВМ, не представлялось возможным.

Существенный вклад в изучение микротопографии поверхностей внес Я. А. Рудзит [316]. Применяя теорию случайных функций, он ввел ряд расчетных формул для определения параметров шероховатых поверхностей, находящихся в упругом, пластичном и упругопластичном контактировании. Учет взаимного влияния неровностей, распределенных по высоте был представлен в работе [317], в которой показано, что с ростом взаимного влияния несущая способность стыка шероховатых поверхностей уменьшается.



Некоторые авторы [210-212] полагают, что профилограмма поверхности в оригинальном виде сложна для дискретизации в виде конечно-элементной сетки из-за непредсказуемости рельефа и трудностей его математического описания. В большинстве работ существует одно допущение, которое может сильно сказаться при расчете КТС, а именно выбор площадки для исследования с характерным размером 100 мкм, а в некоторых случаях и 0,1 мкм [198, 212].

Необходимо отметить, что методы расчета площади контакта [213-217] между плоскостью со случайно распределённой высотой микровыступов и упругим полупространством имеют ряд недостатков:

- если расчет использует параметры по ГОСТ 2789-73, то зачастую это всего один параметр, что в ряде случаев приводит к существенному отклонению от реальных значений (до 7-11%).

- если расчет использует непрерывную функцию поверхности, то это вызывает затруднения при расчетах на практике, так как определение функции поверхности требует достаточно большого количества экспериментальных данных [218].

В работе [326] предлагается высоты микровыступов представлять в виде матрицы высот микронеровностей, которая состоит из совокупности векторов, формирующих матрицу поверхности, над которыми в дальнейшем с помощью ортогональной матрицы вращения Гивенса. Недостаток данного метода в том, что для описания шероховатости поверхности используются волновые функции, но как известно, профиль шероховатой поверхности носит случайный характер, который невозможно описать повторяющейся функцией.

В последнее время для моделирования контакта шероховатых поверхностей используется фрактальная геометрия [219,220]. Преимущество данного подхода заключается в том, что фрактальные параметры остаются постоянными на всех масштабах измерения шероховатости и не зависят от длины выборки.

Взаимодействие твердых тел с реальной топографией поверхности можно правильно оценить только с учетом микро топографии их поверхностей, форма которых далека от идеальной [209]. При таком усложнении, а также имея в виду,

что процесс контактного взаимодействия в общем случае представляет собой совокупность процессов локального деформирования, происходящего вследствие дискретности контакта, трудности математического характера при нахождении решений контактных задач до сих пор остаются непреодолимыми. Тем не менее, на рубеже 2000-х годов, когда возможности вычислительной техники позволили решать задачи подобного типа, появилось множество работ, в которых приводятся результаты моделирования реального рельефа шероховатой поверхности методом конечных элементов [199-210,221-225]. Впервые использование данного метода было продемонстрировано в работе [226]. В этой работе имелись ряд допущений – рассматривался упругий контакт пяти цилиндров, имеющих одинаковый радиус и высоту.

Для построения трехмерных моделей шероховатых поверхностей необходимо располагать параметрами их микрогеометрии. На их основе проводят моделирование реальной шероховатой поверхности набором выступов, имеющих правильную геометрическую форму и распределенных по высоте так, чтобы распределение микровыступов поверхности модели соответствовало распределению микровыступов реальной шероховатой поверхности. В настоящее время микрорельеф поверхности контакта определяется в основном по характеристикам профиля [227]. Для этого созданы приборы и разработаны методики обработки профилограмм [228,229]. В общем случае характеристики микрорельефа шероховатой поверхности не совпадают с характеристиками профиля этой поверхности [230,231]. Анализ микрорельефа поверхностей продолжает представлять существенные трудности даже при применении предназначенных для этого трехмерных профилографов [232]. Одним из выходов в этой ситуации является создание трехмерной модели шероховатой поверхности, наиболее близкой к реальной, с использованием ее для дальнейших расчетов характеристик контакта с учетом различных подходов [233-236].

Так, например в [212,237,238], предлагаются методы, позволяющие построить трёхмерную микрогеометрию поверхностей. Но практически во всех известных работах для описания шероховатости поверхности используются

волновые функции, что в дальнейшем может существенно сказаться на результатах расчета. Анализируя профилограммы шероховатых поверхностей, можно сказать, что профиль шероховатой поверхности носит случайный характер, который невозможно описать повторяющейся функцией. Поэтому поверхности микронеровностей, смоделированные методом с использованием подобных функций, будут некорректно отображать шероховатость поверхности, и, как следствие, фактическую площадь контакта между смоделированными поверхностями.

Немаловажными характеристиками, определяющими контактную прочность, жесткость, термо- и электросопротивление, формирующими силы трения и износа, являются сближение (перемещение одной плоскости касания относительно другой) и фактическая площадь касания. Эти характеристики в значительной мере обеспечивают эксплуатационные свойства соединений. Благодаря этим характеристикам возможно получение информации о межконтактном объёме. Расчет фактической площади контакта весьма важен для многих технических приложений контактной механики [318]. Именно на площадках фактического контакта происходят процессы адгезионного и фрикционного взаимодействий; локальное разрушение поверхностей, перенос электрического заряда и тепловой энергии. При этом проведение экспериментов с целью определения площади контакта и величины сближения достаточно трудоемки и не дают достаточно ясного представления о величине сближения, плотности контакта и объеме зазора в стыке. В некоторых случаях для определения этих характеристик пользуются математическим аппаратом опорных кривых [310, 317, 319-321].

Многочисленные публикации в области моделирования микротопографии поверхности, появившиеся после 2010 года, свидетельствуют об актуальности тематики, её незавершённости. Вместе с тем достижения в области микротопографии и программного обеспечения 3-х мерного проектирования и программных систем конечно-элементного анализа линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики

деформируемого твёрдого тела и механики конструкций, теплопередачи и теплообмена, позволяют разработать методику расчетов тепловых процессов в контактных соединениях на основе анализа профилограмм поверхностей, 3-х мерного представления этих поверхностей и выполнения дальнейшего механического и теплового анализа.

### 3.2. Основные параметры микрорельфа

Основываясь на ранних исследованиях процессов теплопередачи через соприкасающиеся поверхности [114,115,322-327], можно обосновать, что именно дискретность фактического контакта поверхностей тел образует термическое сопротивление, проявляющееся при протекании тепловых потоков через соприкасающиеся границы тел.

Для дальнейшего рассмотрения способов нахождения КТС нужно оценить методы учёта микронеровностей в данной задаче. Поиск подхода к моделированию шероховатых поверхностей стоит начать с рассмотрения всех базовых положений о шероховатостях (Рис.3.1).

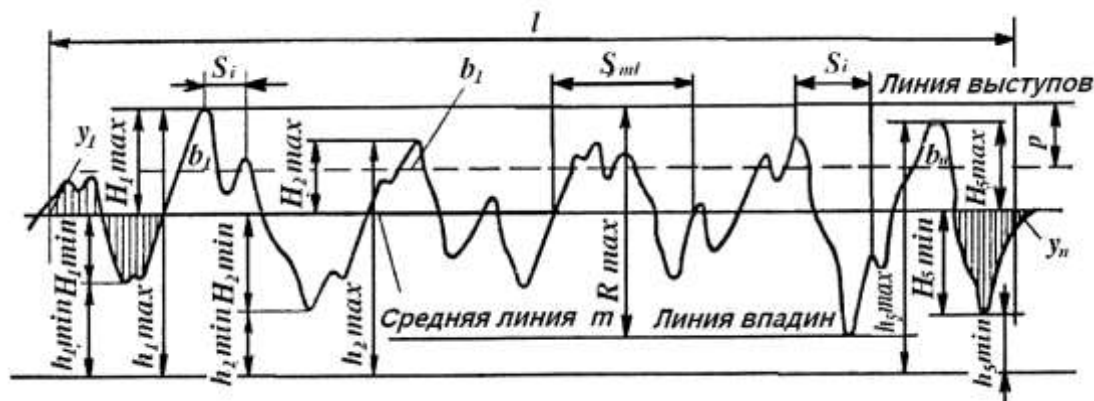


Рис.3.1. Профиль шероховатости поверхности

Неровности поверхности можно распределить по трем категориям: шероховатость, волнистость и макроотклонения формы. К последним относят единичные отклонения реальной поверхности от номинальной.

Волнистость - совокупность периодических, регулярно повторяющихся, близких по размерам выступов и впадин, расстояние между которыми значительно больше, чем у неровностей, образующих шероховатость поверхности, и превышает базовую длину  $l$ , используемую для оценки

шероховатости. Расстояние между вершинами волн (шаг волны) находится в пределах 0,8—10 мм, а высота 0,03—500 мкм. Наличие волн на поверхности приводит к уменьшению опорной площади в 5—10 раз по сравнению с ровной шероховатой поверхностью. Волнистость представляет собой совокупность периодически повторяющихся возвышений и впадин с взаимным расстоянием, значительно большим, чем у неровностей, образующих шероховатость. Такой подход к разделению шероховатости и волнистости является сложившимся в процессе изучения неровностей под влиянием развития техники измерений, но весьма условным.

Шероховатость, в свою очередь, это совокупность микронеровностей с малым шагом, образующих рельеф поверхности, рассматриваемых в пределах участка, длина которого равна некоторой базовой длине. Шаг может изменяться в диапазоне от 2 до 800 мкм, а высота 0,03-400 мкм. Базовую длину выбирают таким образом, чтобы на ней не проявлялись другие виды неровностей (волнистость и макроотклонения).

Геометрия и распределение микронеровностей зависят от кинематической схемы станка и способа обработки, механических свойств материала и колебаний в системе «станок – приспособление – инструмент -деталь». Волнистость возникает в результате действия вынужденных колебаний во время механической обработки изделия.

Макроотклонения образуются вследствие наличия погрешностей, вызванных характеристиками станка и инструмента, а также упругими деформациями, возникающими под влиянием переменной силы резания.

Для оценки микрогеометрии поверхности пользуются ее профилем, представляющим собой сечение поверхности плоскостью, перпендикулярной к этой поверхности и ориентированной в некотором заданном направлении. Профилограмму в направлении, перпендикулярном к следам обработки (или следам в результате износа), называют поперечной, а в направлении следов обработки — продольной.

Физически обоснованной, а тем более естественной физической границы между шероховатостью и волнистостью поверхности как совокупностью неровностей с шагами, превышающими базовую длину, не имеется. В соответствии с [227,328-330] Существуют 6 параметров оценки шероховатости поверхности:

Среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3.1)$$

или приближенно:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.2)$$

Высота неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$  равна средней арифметической суммы абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов  $H_{i \min}$  и пяти наибольших максимумов  $H_{i \max}$  профиля в пределах базовой длины:

$$Rz = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| \right) \quad (3.3)$$

Вместо средней линии, имеющей форму отрезка прямой, определяют расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов  $h_{i \max}$  и низших точек пяти наибольших минимумов  $h_{i \min}$  до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль.

$$Rz = \left( \sum_{i=1}^5 h_{i \max} - \sum_{i=1}^5 h_{i \min} \right) \quad (3.4)$$

Средний шаг неровностей  $S$  вычисляют как среднее арифметическое значение шага неровностей  $S_{mi}$  в пределах базовой длины:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (3.5)$$

Средний шаг неровностей профиля по вершинам  $S$  — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам  $S_i$  в пределах базовой длины

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (3.6)$$

Под опорной длиной профиля  $\eta_p$  понимают сумму длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне в материале выступов профиля линией, эквидистантной средней линии.

Относительная опорная длина профиля  $t_p$  определяется как отношение опорной длины профиля  $\eta_p$  к базовой длине:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b p_i \quad (3.7)$$

Отмеченные показатели точно описывают изменчивость высоты шероховатой поверхности в вертикальном измерении, предоставляя важную информацию о закономерностях изменения характеристик поверхности.

Изучение особенностей поверхности, а также свойств, основанных на параметрах микроскопических поверхностей, является сегодня основным направлением исследований контакта материалов [331-334]. При использовании традиционных методов определения характеристик достаточно сложно точно определить основные характеристики морфологии шероховатой обработанной поверхности.

Следовательно, для количественного описания геометрических свойств поверхности требуются параметры, не зависящие от масштаба.

Задача поиска взаимного расположения двух поверхностей контакта и фактической площади соприкосновения наиболее полно может быть решена в трехмерном виде, в частности, путем создания цифровой модели исследуемого объекта (поверхности) — системы математических и компьютерных моделей, а

также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которых на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям [335]. Решение задачи построения трехмерной геометрии контактирующей шероховатой поверхности может быть выполнено по данным, полученным из профилограммы поверхности.

### **3.3. Методы получения профилограмм поверхностей**

При рассмотрении проблем полного моделирования всей шероховатой поверхности ставится ряд вопросов о целесообразности такого подхода. При составлении цифрового двойника полной поверхности в разы увеличивается объем модели и необходимая для её обработки мощность. При поверхностном анализе можно прогнозировать, что размер элементов при построении сетки на поверхности должен быть не более чем высота неровности порядка 1-4 мкм. Поскольку на поверхности в 3 мм<sup>2</sup> оптимальная сеточная модель имеет количество ячеек порядка 500 000 тысяч, то деталь с площадью контакта до 3 см<sup>2</sup> может иметь размер сеточной модели от 10 и более миллионов ячеек. Любой расчёт подобного рода моделей необходимо вести уже на сверхмощных компьютерах или вычислительных кластерах. Выходом для решения данной задачи становится допущение, что шероховатость поверхностей имеет одинаковый характер по всей площади контакта. Данные о шероховатых поверхностях и трибологические исследования позволяют нам считать данное допущение близким к действительности и не снижающим точность. Благодаря такому подходу мы получаем возможность моделировать не весь объем конструкции, а лишь маленький участок, в котором площадь контакта представляет собой плоскость.

При рассмотрении способов снятия данных профилограммы были рассмотрены профилометры различного принципа действия. Снятие профилограмм происходило в МАИ: на профилографе Surftest SV-3100 (Рис.3.2.) контактным методом и на трехмерном измерительном лазерном микроскопе LEXT OLS5000



(Рис.3.3.) бесконтактным методом. Выбор двух различных способов измерения был осуществлён по причине поиска наиболее точного метода измерения, что позволило бы минимизировать погрешность построения трёхмерной модели поверхности.

#### Контактные методы измерения профиля.



Рис. 3.2. Профилограф Surftest SV-3100

Принцип работы профилографа – регистрация колебаний алмазной иглы перемещающейся по поверхности. Игла перемещается вдоль поверхности, перпендикулярно её плоскости, при этом, на шероховатой поверхности, неизбежно, возникают перемещения иглы. Перемещения иглы с помощью преобразователя (индуктивного, пьезоэлектрического или ёмкостного) преобразуется в малые электрические токи, которые после усиления гальванометром поступают в регистрирующее устройство. Профилограф состоит из нескольких блоков: измерительного, преобразовательного и записывающего. Первый блок - называется измерительным, поскольку именно в нем получается сигнал, который является основой всего измерения. На основании этого сигнала и строится впоследствии кривая, характеризующая микронеровности. Данный блок состоит, как правило, из иглы, привода иглы и измерительного столика.

Второй блок - преобразовательный электронный, в котором сигнал из первого блока усиливается и преобразуется при помощи специальных электронных преобразователей.

Третий блок - записывающий, на который поступает обработанный сигнал со второго блока. Обработанный сигнал, при помощи записывающего устройства,

аналогового или электронного, преобразуется в профилограмму в увеличенном масштабе. При этом в качестве материала для вычерчивания профилограммы может выступать металлизированная бумага, светочувствительная бумага или специальная пленка. Принцип действия профилографа мало чем отличается от принципа действия профилометра, единственным отличием, здесь, является отображение результатов не на экране в виде числовых значений, а графически. Профилограмма записывается устройством в увеличенном масштабе, при этом, по горизонтали увеличение достигает 100 000 раз, а по вертикали от 400 до 200 000 раз. Все показания о микрогеометрии выводятся на дисплей прибора. Погрешность профилографа не выходит за рамки  $\pm 5-10\%$ .

### Бесконтактные методы измерения



Рис. 3.3. Трехмерный измерительный лазерный микроскоп LEXT OLS5000

В трехмерном измерительном лазерном микроскопе есть оптические системы двух типов: оптическая система цветного изображения и лазерная конфокальная оптическая система.

Оптическая система цветного изображения позволяет получить цифровое изображение образца с использованием светодиодного источника белого света и датчика изображения. Одновременно возможно получение цветовой информации об образце. Так как глубина фокуса оптической системы цветного изображения больше, чем у лазерной конфокальной оптической системы, оптическая система цветного изображения используется для поиска позиции измерения образца.

Лазерная конфокальная оптическая система (Рис.3.4.) позволяет получать конфокальное изображение с помощью полупроводникового лазерного источника света (длина волны: 405 нм) и высокочувствительного спектрального детектора (фотоумножителя). Лазерная конфокальная оптическая система дает более четкое изображение более высокого контраста, чем оптическая система цветного изображения. Кроме того, лазерная конфокальная оптическая система отличается чрезвычайно малой глубиной фокуса, что используется для измерения неровной поверхности образца.

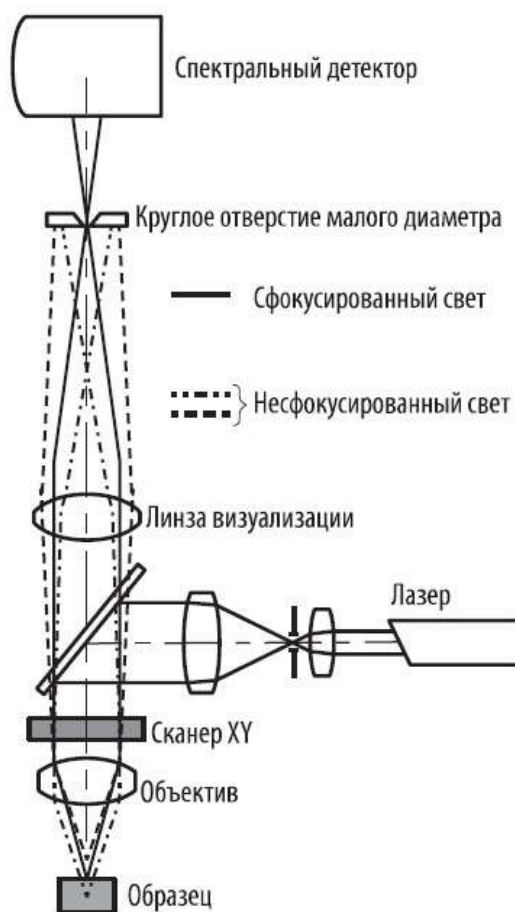


Рис. 3.4. Лазерная конфокальная оптическая система

Лазерная конфокальная оптическая система сканирует поверхность образца в направлении ХУ (горизонтально) с помощью сканера ХУ, испускающего лазерный луч, сфокусированный объективом в пятно минимального размера, на поверхность образца.

Отраженный или рассеянный образцом свет снова собирается объективом и линзой визуализации, после чего пропускается спектральным детектором через

круглое отверстие малого диаметра. Данные сигнала интенсивности спектрального детектора в соответствии с позицией сканирования в плоскости ХУ преобразуются в наблюдаемое изображение поверхности образца.

При этом в спектральный детектор через круглое отверстие малого диаметра попадает только свет, отраженный от сфокусированной зоны. Поэтому получается изображение только сфокусированной зоны, а остальные зоны остаются полностью черными.

Такое изображение называется конфокальным, но, так как оптически исследуется и отображается только сфокусированная зона, его также называют послойным оптическим или секционным изображением (Рис.3.5.). Данный микроскоп позволяет получать более четкое изображение более высокого контраста, чем обычный оптический микроскоп.

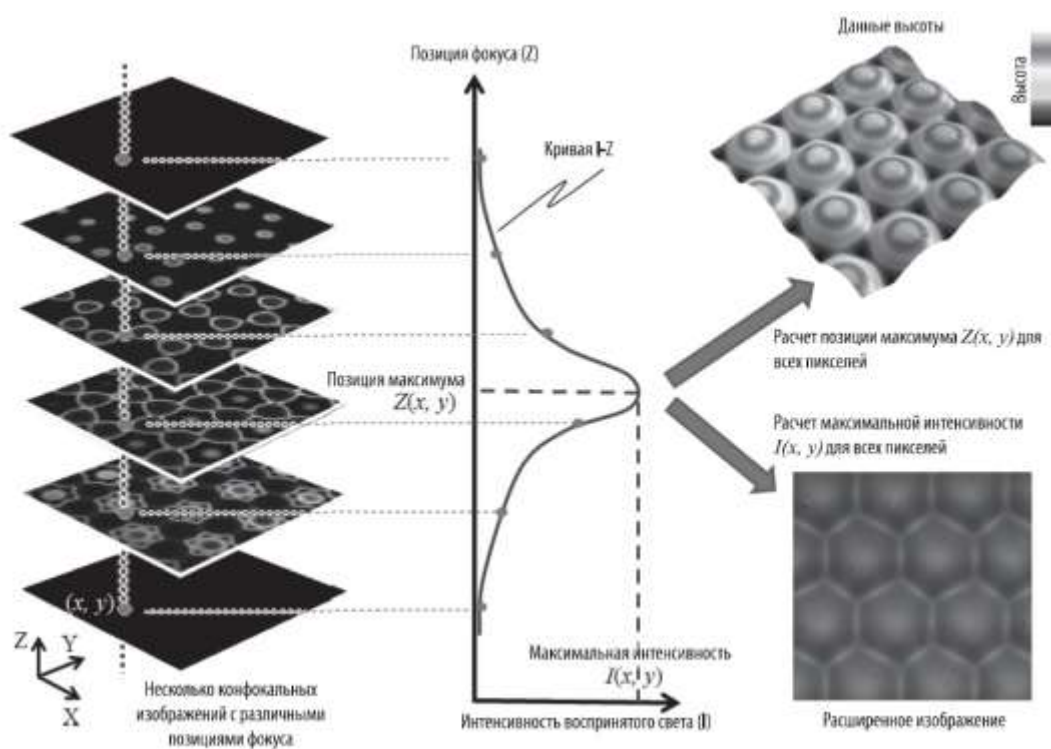


Рис.3.5 - Принцип измерения высоты

При измерении высоты прибор автоматически выдает несколько конфокальных изображений с различными позициями фокуса. На основе зависимости между дискретной позицией фокуса ( $Z$ ) и интенсивностью полученного света ( $I$ ) строится кривая изменения интенсивности света (кривая I-

Z) для каждого пикселя с целью расчета позиции максимума и максимальной интенсивности.

Так как данные позиции максимума для всех пикселей соответствуют неровности образца, получается трехмерное изображение (данные высоты) поверхности образца.

Аналогично этому, данные по максимальной интенсивности позволяют получить изображение, в котором сфокусированы все позиции на поверхности образца (расширенное изображение).

Аналитическое приложение прибора используется для выполнения различных измерений и их анализа на основе данных высоты, а также расширенное и цветное изображения, полученные оптической системой цветного изображения.

В результате проведенных измерений шероховатости поверхностей (Приложение 1) получены данные о микрогеометрии образцов выполненных из разных материалов. Оценочный анализ влияния метода снятия данных о неровности поверхности проведен на основе характеристики профиля шероховатости  $R_a$ . Данные приведены в таблице № 3.1.

Таблица № 3.1

| Материал  | $R_{a1}$<br>мкм | $R_{a2}$<br>мкм | Отклонение<br>% |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 12X18НТ   | 0,328           | 0,287           | 14,29           |
| Фарфор    | 2,275           | 2, 204          | 3,12            |
| Молибден  | 0,447           | 0,441           | 1,34            |
| Д16       | 1,483           | 3,195           | 115,44          |
| Графит    | 1,615           | 2,614           | 61,86           |
| $Al_2O_3$ | 6,192           | 7,199           | 16,26           |

где  $Ra_1$  – характеристика поверхности, профилографом,  $Ra_2$  – характеристика поверхности, измеренная лазерным микроскопом.

Оценочный анализ позволяет заключить, что контактные методы измерения параметров шероховатости поверхности могут быть рекомендуемы лишь для материалов с высокой твёрдостью. В ином случае воздействие механизма измерения, а именно алмазной иглы, на поверхность может внести критическую погрешность на данном этапе построения модели. Рекомендуемым же методом становится метод бесконтактного измерения. Помимо того, что он не оказывает воздействия на поверхность, он также обеспечивает больший объем данных, что позволяет получить и реализовать более легкий механизма отсеивания грубых погрешностей и мелких повреждений поверхности.

### **3.4. Формирование облика макета цифрового двойника поверхности на основе облака точек**

Моделирование процессов теплопереноса в зоне контакта невозможно без создания макета цифрового двойника реальных поверхностей. Такая модель создаётся на основе отобранных данных профилограммы поверхности, с помощью специального алгоритма, снижающего излишний объем необходимых для обработки вычислений и устраняющего избыточность информации перед процессом создания цифрового двойника.

Попытки моделирования геометрии поверхности представлены в работах [332 - 337]. Так например, были испытаны способы разбиения реального профиля и представление его в виде набор стержней с элементарной площадью основания и соответствующей высотой, представление высот микровыступов в виде матрицы высот микронеровностей, которая состоит из совокупности векторов, формирующих матрицу поверхности, над которыми в дальнейшем производят ортогональные преобразования и использование фрактальной геометрии [332]. Гринвудом и Триппом [336] были произведены попытки смоделировать контакт двух шероховатых поверхностей как эквивалентный контакт одиночной шероховатой поверхностью с гладкой плоскостью. В работе [337], где поверхность представлена с помощью описания рядом Вейерштрасса, показано,

что никакое приложенное давление не является достаточно высоким, чтобы обеспечить полный контакт. Исследования выполненные в рамках этой работы лишь подтверждают, невозможность свести прогнозирование характеристик контакта к какой-либо аналитической зависимости.

Так же сложность в описании контакта возникает по причине того, что использование нескольких статистических параметров шероховатости или одного профиля шероховатости недостаточно для описания топографии контактной поверхности из-за анизотропии контактной поверхности [338]. Именно поэтому построенные в работе [339] модели случайных шероховатых поверхностей вряд ли обеспечат высокую точность расчётов. Однако предложенные идеи о способах моделирования поверхностей стали позже основой для создания в дальнейшем других способов построения моделей шероховатых поверхностей. Проведенная в работе [340] оценка показала, что для получения результатов, сравнимых с экспериментальными данными, в модель необходимо включать неровности второго уровня (микрошероховатости). Реализованный контакт двух шероховатых поверхностей медных тел, представленный в виде пространственной двухуровневой (шероховатости и микрошероховатости) модели с использованием фрактальной функции Вейерштрасса–Мандельброта, показал потенциал создания трёхмерных моделей шероховатых поверхностей.

В некоторых современных исследованиях, таких как [341] многие модели формируются следующим образом: равномерная сетка начальных узлов размещена на плоскости с шагом 10 мкм, затем узлы смещаются по нормали к плоскости в соответствии с масштабированной фрактальной функцией Вейерштрасса–Мандельброта. Далее производится поиск в области образования первого контактного пятна и модель вырезается до этой области, после чего строится шероховатость второго уровня путем размещения дополнительных неровностей на поверхности шероховатости первого уровня. Узлы более мелкой сетки смещены в направлении оси  $z$  по Вейерштрассу – Мандельброту и функционируют при десятикратно меньшей величине. Пример построенной таким образом модели приведен на рисунках 3.6 и 3.7.

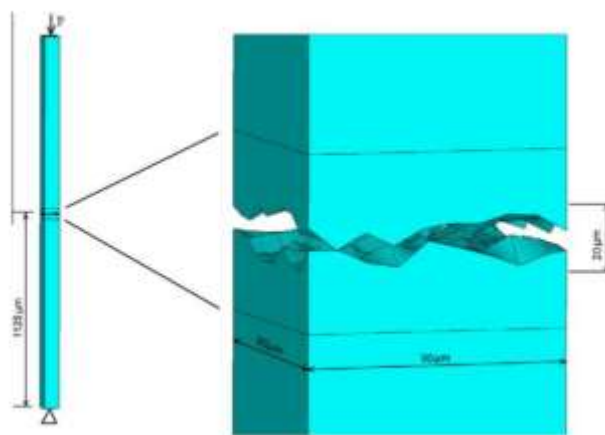


Рис. 3.6. Контактная модель тел с шероховатостью первого уровня.

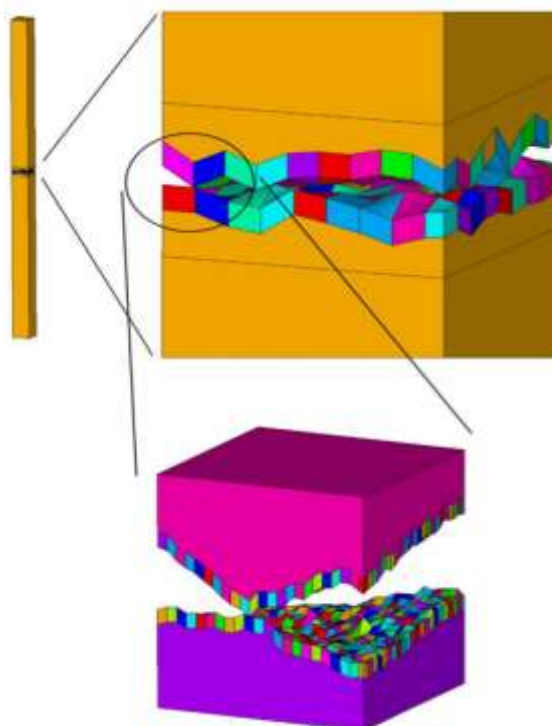


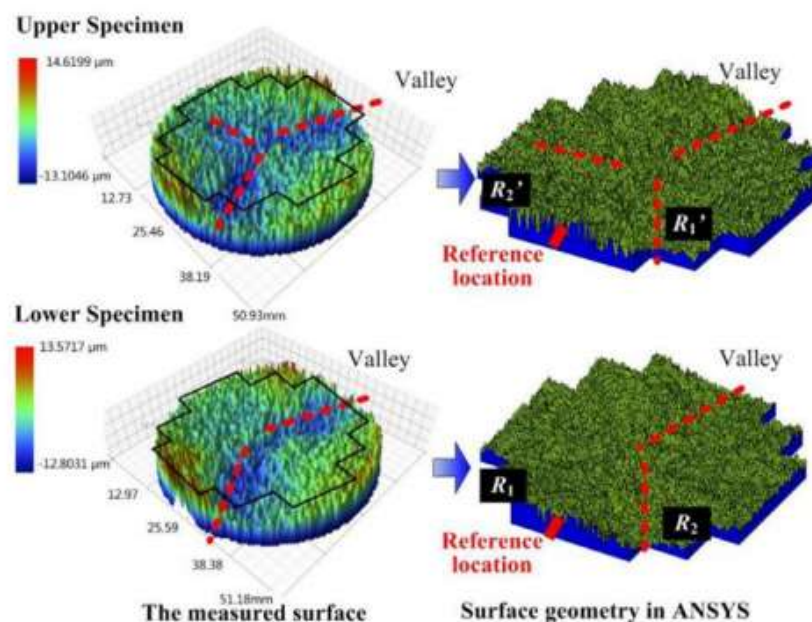
Рис. 3.7. Поверхностные слои тел в модели с шероховатостью первого и второго уровня.

Такая модель, даже при создании шероховатости больших уровней, лишена способности моделировать округлые пики неровностей, наличие которых может значительно изменить расчетную реальную площадь контакта.

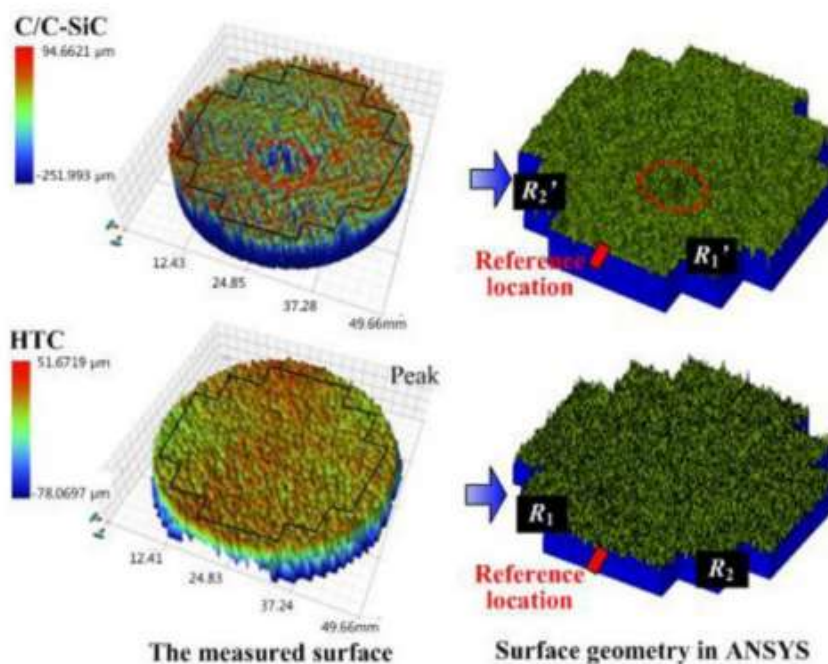
В работе [342] представлен похожий способ создания расчётной модели геометрии. Две шероховатые поверхности измеряют с помощью интерференционного микроскопа белого света (Bruker Contour GT-K 3D Optical Microscope). Измеренные данные с соответствующей обработкой данных (только данные в расчетной области) можно импортировать в ПК ANSYS для восстановления его геометрии. Сначала создаются «ключевые точки» (КТ) по



входным данным (координаты  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), а затем четырьмя соседними КТ создаются неплоские области (участок Кунса), и шероховатая поверхность окончательно реконструируется. Длина выборки в этой работе получается около 0,25 мм. Иллюстрация измеренных поверхностей и их реконструкция в ПК Ansys данным методом приведена на рисунке 3.8.



a)



б)

Рис. 3.8. Измеренные поверхности и геометрия, реконструированная в ANSYS.

Предложенная авторами этой работы модель выглядит достаточно реалистично, но моделирует лишь малую часть поверхности. Для некоторых материалов с большим средним шагом неровности этот принцип построения может оказаться неприменимым. Так же он требует наличия специального измерительного оборудования для создания модели, т.к. не все средства обеспечивают возможность построения описанного облака точек с должным разрешением и шагом.

Многие из описанных выше подходов, трудно применимы для инженерных расчетов, особенно для композиционных материалов, так как либо не обеспечивают необходимую точность расчетов площадей контакта, либо имеют сложный математический аппарат.

Поскольку, игнорирование микрогеометрии может привести к недостоверному определению теплового состояния контакта. Метод создания макета цифрового двойника поверхности основывается на преобразовании данных снятой с неё профилограммы, преобразованной в трёхмерную цифровую поверхность. Так как базой для модели является полноценная кривая поверхности, то при сохранении всех характеристик распределения (средний шаг неровности, характер распределения и шаг между точками) возможно получить результат учитывающий микрогеометрию.

На основе вышеописанного алгоритма была выполнена его программная реализация. Программа пошагово обрабатывает данные профилограммы, выполнив вначале их фильтрацию. Данный этап позволяет значительно снизить вес модели. Это возможно из-за того, что большая часть точек поверхности лежит на прямой между локальными максимумами и минимумами. Поэтому такие точки не несут в действительности никакого влияния на модель и построенная по остальным точкам поверхность будет проходить через них так же как и реальная.

После фильтрации точек программой просчитывается построение кривой неровности на интересующей нас длине. Для этого этапа нам важно сохранить характер распределения высот, чтобы не дублировать максимальные пики и впадины, иначе модель нельзя считать эквивалентной.

На первом этапе производится сортировка точек по убыванию координаты. Координаты точек приводятся к безразмерным и по точкам с помощью линейной интерполяции строится кривая распределения. После этого высчитывается количество новых точек для данной длины поверхности. Значения в новых точках считаются исходя из найденного распределения на безразмерной длине. Координата точки приводится к безразмерной, а сама точка должна лежать на кривой распределения. После чего все найденные точки алгоритм случайным образом распределяет в облако точек, сохраняя лишь условия, что шаг неровности должен оставаться постоянным и кривизна моделируемой поверхности не должна превышать кривизну исходной.

Входными данными является текстовый файл, в который заносится значения профиля в виде двух столбцов, в первом из которых находится значение координаты, а во втором, значение неровности.

Для упрощения и сокращения времени подсчёта значения КТС были предложены два метода обработки и просеивания начальных данных шероховатости.

#### **3.4.1. Метод вершин**

Суть метода заключена в разбиении профилограммы по среднему шагу неровности. На каждом разбитом отрезке характеризующей величиной будем считать максимальное отклонение шероховатости от средней линии. Это позволит сохранить общую картину, значительно сократив количество обрабатываемых данных. Чтобы исключить мелкие неровности вдоль средней линии, которые негативно влияют на величину среднего шага и излишне нагружают модель, вводим параметр минимальной длины шага неровности. Шаг неровности должен превышать значение  $2R_a$ . При выполнении данного условия производится запись точек данного отрезка в массив. Такой метод можно описать как сглаживание профиля. Мелкие неровности порядка 1–2 микрометров сглаживаются, и модель принимает облегчённый вид.

Изначальные данные поступают в виде массива, затем каждый элемент проходит проверку принадлежности впадине или выступу, сравниваясь с нулём.

Во время проводимой проверки мы анализируем, в какой момент участок впадины или выступа закачивается, используя переменные  $k$  и  $z$ . В каждом локальном уступе или вершине нужно найти соответствующее максимальное отклонение от средней линии и записать его в новый массив данных.

Изначальное количество точек неизвестно, как и их значения. Данные реальных профилей записываются в текстовый документ в виде двух колонок, первая из которых является координатным значением, а второе непосредственно собственным значением отклонения точки от средней линии.

Так как количество данных заранее не известно, то в программе запись данных идёт в двумерный динамический массив  $A[n][2]$ , размер которого определяется из количества строк в текстовом документе.

Данные из массива  $A$  обрабатываются и выборочно записываются в новый динамический массив  $C$  той же размерности, что и  $A$ .

Полученные точки переносятся в трёхмерный массив в случайном порядке, но с условием не повторяющихся значений. Полученный массив величин характеризует поверхность в виде облака точек, распределённых по площади равной квадрату задаваемой новой базовой длины.

Плюсом данного метода является низкая требовательность к вычислительным ресурсам из заметного сокращения количества рассматриваемых точек. Такой подход дает заметный выигрыш для композитных материалов, керамических материалов и порошковых металлических напылений с крупным зерном.

Более того, модель, построенная этим алгоритмом, в большей степени отражает не только волнистость поверхности, но так же не исключает важные для КТС “одиочные” пики. И при анализе металлических поверхностей с низкой шероховатостью данный метод является оптимальным.

Например, при анализе профиля нержавеющей стали 12X18H10T мы получаем сокращение с 2800 точек до 130, что находится в рамках достаточной точности.

По результатам измерения шероховатости образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т выбиралось среднее значение по трём измерениям. Профилограмма поверхностей с  $R_a=0.647$  мкм и  $R_a=0.531$  мкм представлены на рисунках 3.9, 3.10

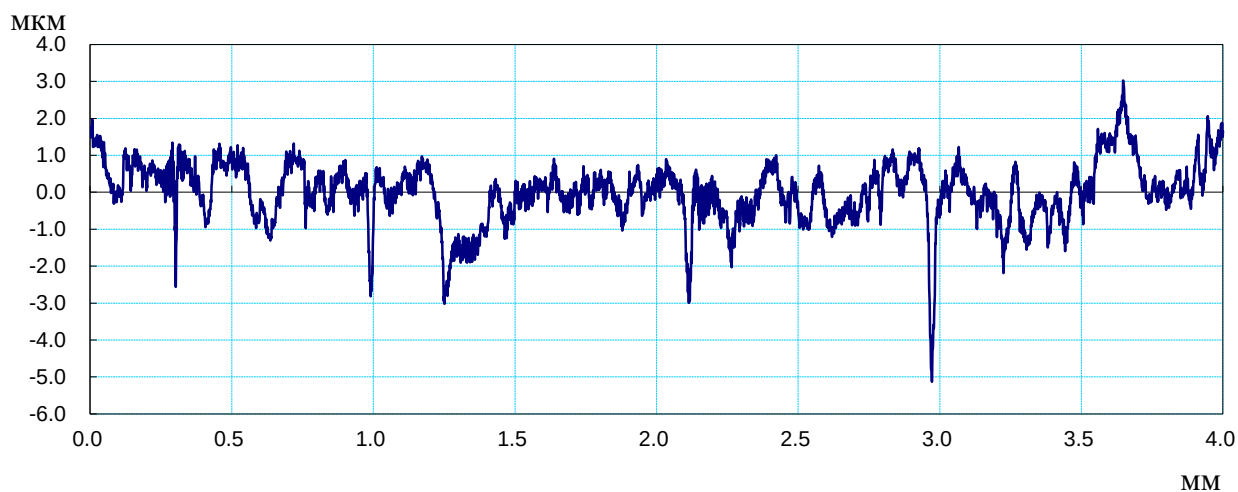


Рис.3.9. Шероховатость поверхности с  $R_a=0.647$ .

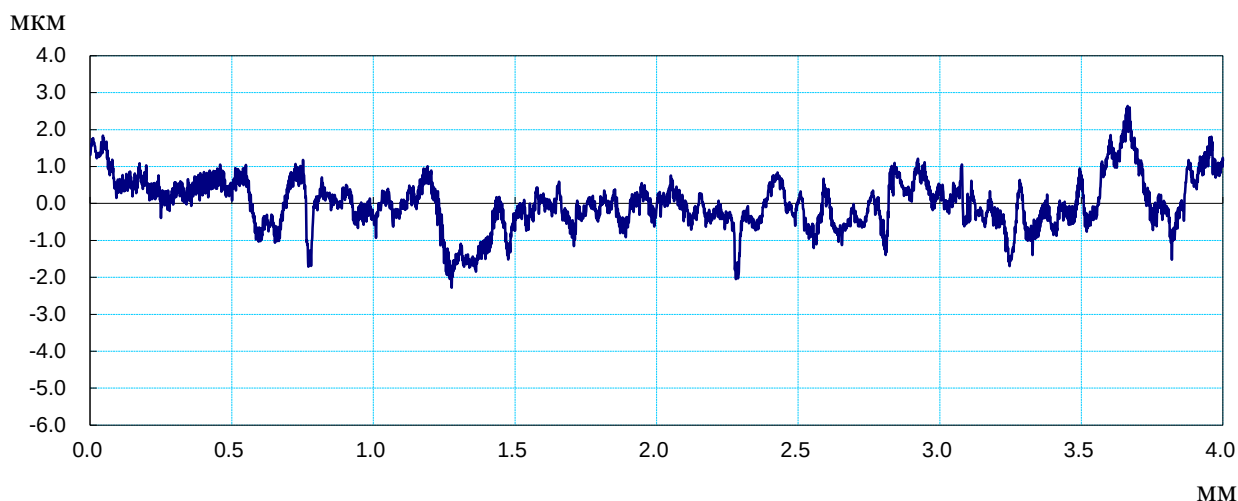


Рис..3.10. Шероховатость поверхности с  $R_a=0.531$ .

При снятии профилограммы поверхности профилометром *Mitutoyo SurftestSJ-210* получены значения точек микрорельефа с шагом по оси абсцисс 0,5 мкм, что на базовой длине в 16 мм позволило получить 32000 точек со своими значениями высот (Рис.3.11).

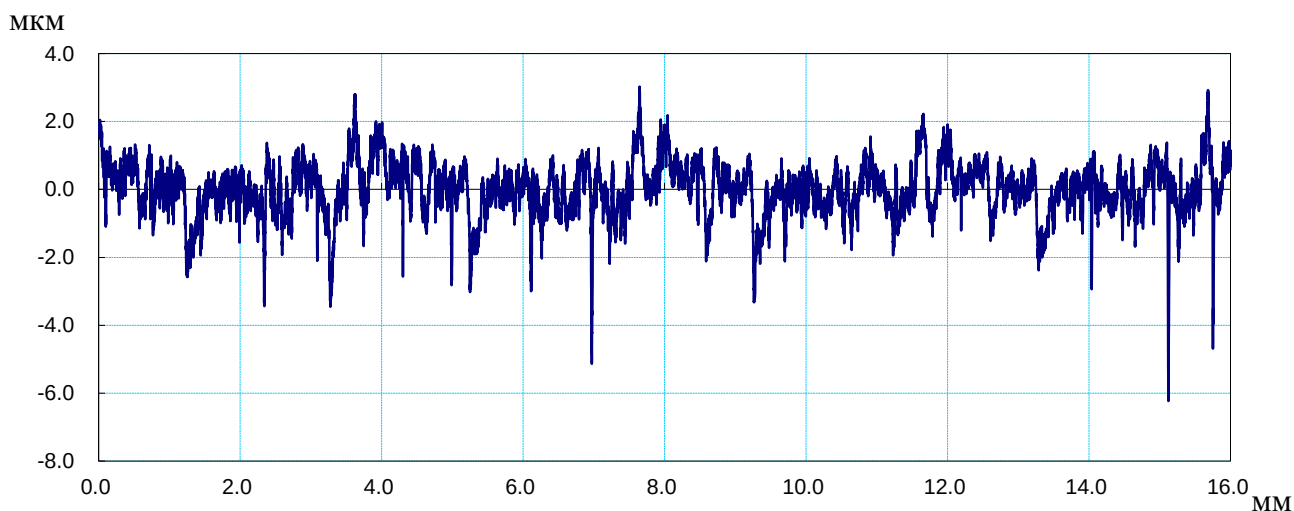


Рис.3.11. Шероховатость поверхности с  $R_a=0.647$  на базовой длине 16мм.

Для точного определения среднего шага неровности и уменьшения количества точек профилограммы производилась выборка точек впадин и выступов шероховатой поверхности. В результате получен массив точек содержащий данные только о выступях и впадинах профиля (рис.3.12)

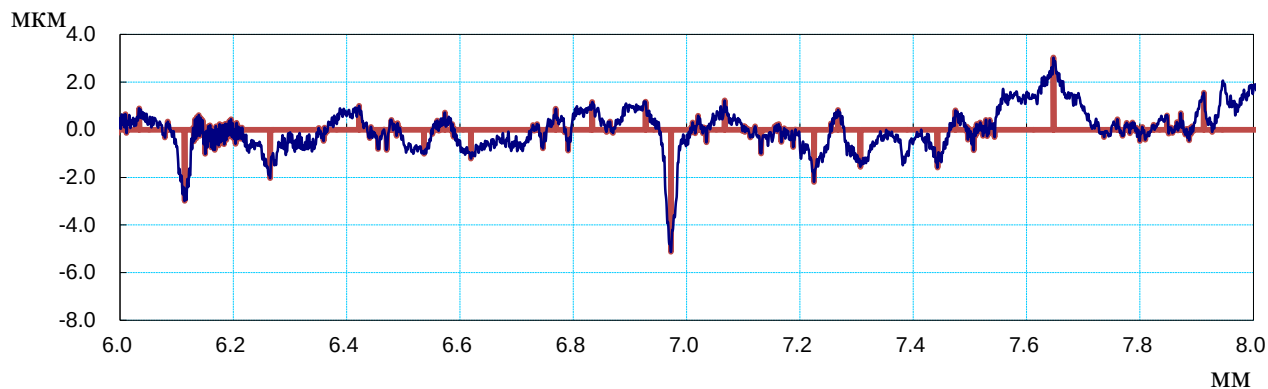


Рис.3.12 – График выступов и впадин шероховатой поверхности.

Зная количество точек выступов и впадин определяется средний шаг неровностей профиля по формуле:

$$S=L/P \quad (3.8)$$

где  $P$ - количество точек,  $L$  –базовая длина.

В данном случае, количество точек  $P = 1485$ , соответственно средний шаг неровностей профиля  $S = 10.774$  мкм.

Распределение высот микровыступов по всей поверхности контакта можно получить из профилограммы поверхности, отсортировав все точки от максимального до минимального значения по высоте микровыступа и обезразмерив значения по базовой длине (Рис. 3.13.). В дальнейшем это дает возможность использовать данное распределение для любых размеров расчетных областей, умножив на требуемую базовую длину. Знание точного распределения высот микровыступов по всей поверхности контакта представляет высокую ценность для расчета параметров контактирования двух шероховатых поверхностей, поскольку именно от начальной площади касания зависит распределение теплового потока в зоне контакта и как следствие температурного напора.

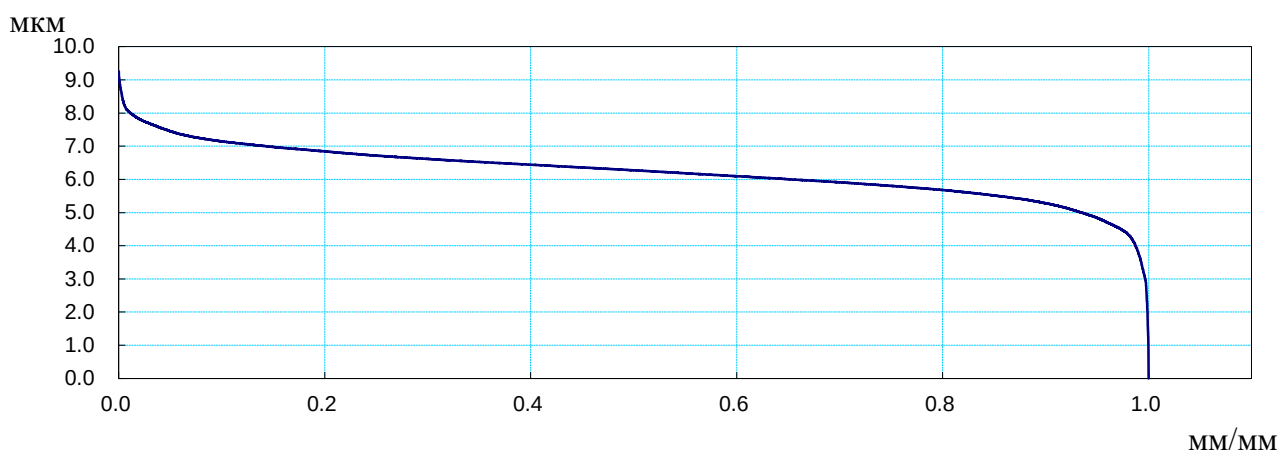


Рис.3.13. Распределение микровыступов по высоте для образца с  $R_a = 0.647$

Таким образом, для моделирования поверхности имеются все необходимые данные: средний шаг неровностей, распределение высот микровыступов по высоте, длина моделируемой поверхности. Для автоматизации процесса получения координат точек поверхностей и работы с массивом данных точек была написана программа на языке Фортран. Результат работы программы – таблица данных с координатами точек  $(x, y, z)$  шероховатой поверхности.

Алгоритм работы программы представлен на рисунке 3.14, а текст программы представлен в Приложении.

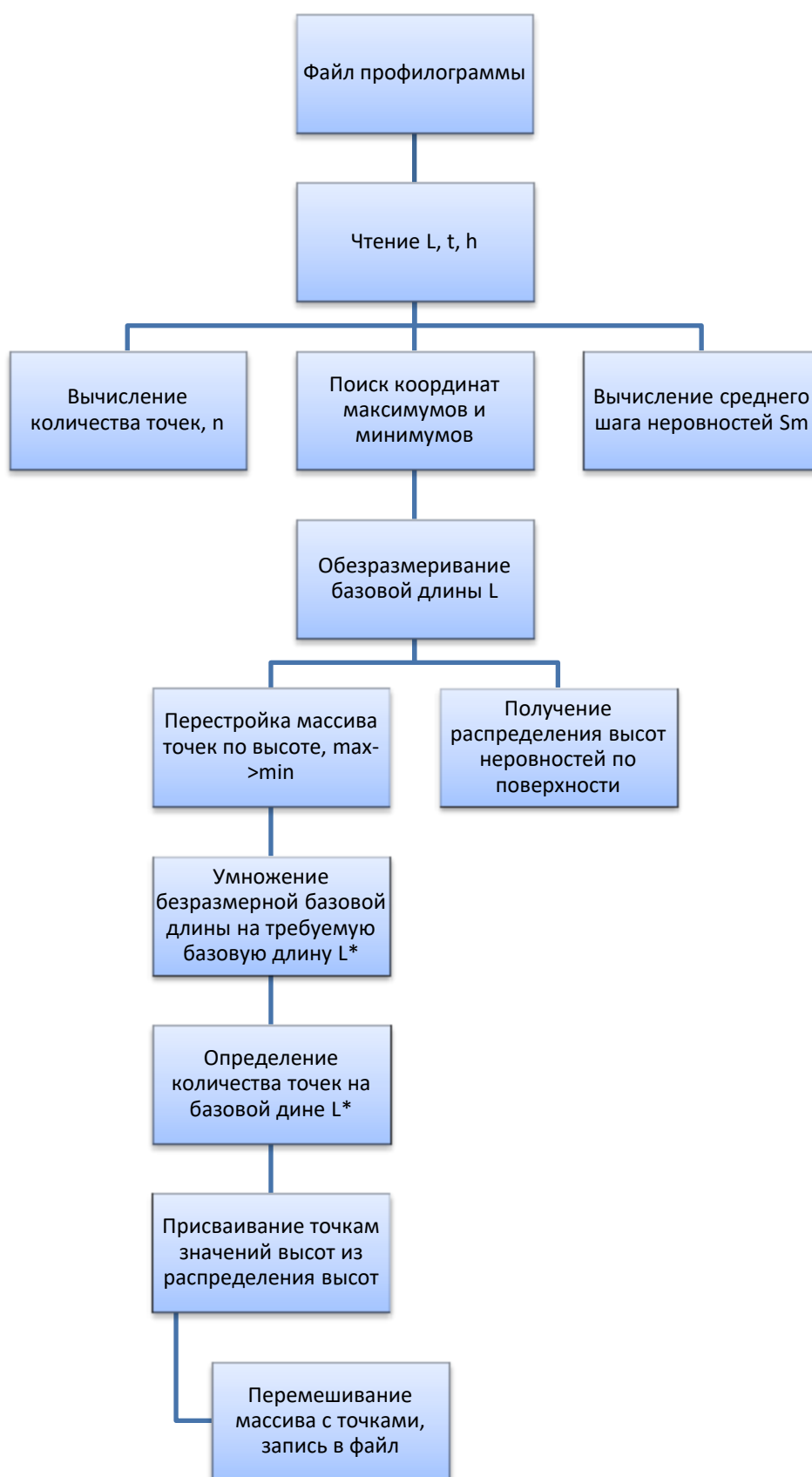


Рис.3.14. - Алгоритм работы программы



Пример работы программы на языке Фортран представлен на рис. 3.15.

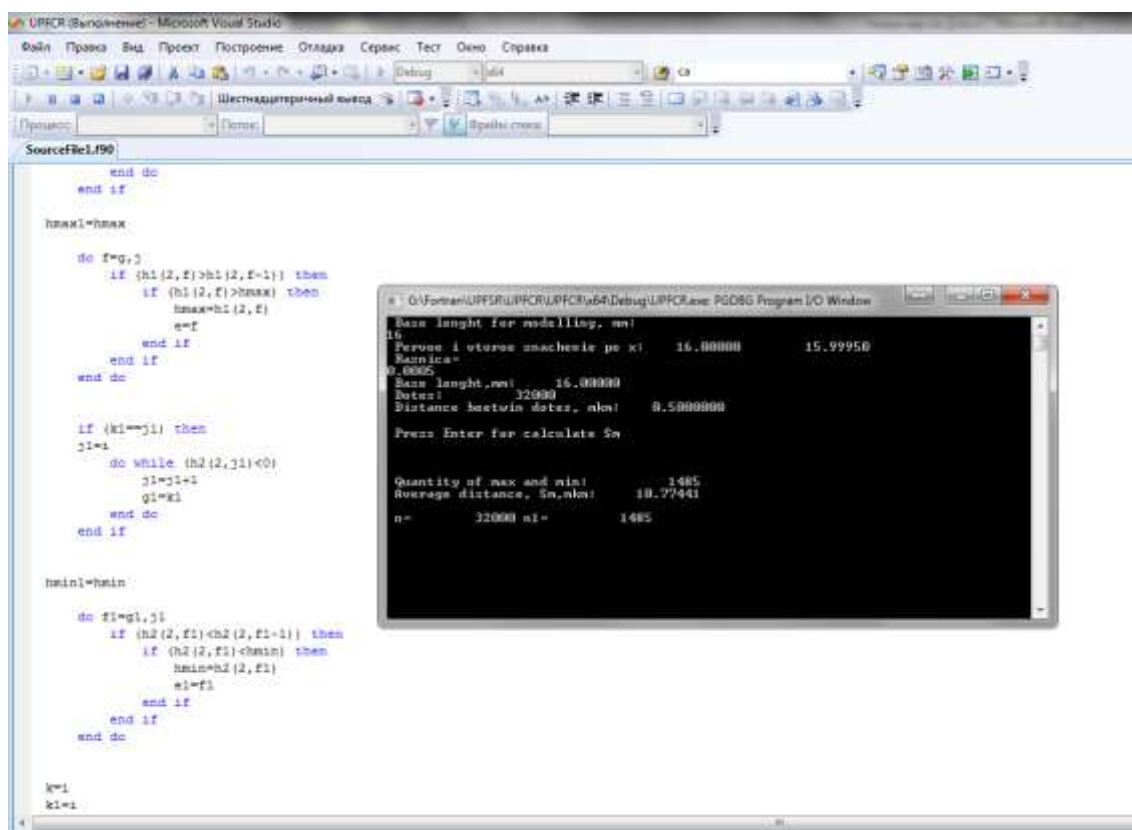


Рис.3.15. Пример работы программы.

Файлы профилограммы и массива полученных точек выглядят соответственно (Рис.3.16):

The screenshot shows two text files. The left file 'Znach.txt' contains a list of values in scientific notation. The right file 'Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt' contains a list of values in decimal notation.

| File                           | Value                            |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Znach.txt                      | 16 9.38E-01                      |
| Znach.txt                      | 15.9995 9.59E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.999 1.06E+00                  |
| Znach.txt                      | 15.9985 1.16E+00                 |
| Znach.txt                      | 15.998 1.11E+00                  |
| Znach.txt                      | 15.9975 9.24E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.997 7.53E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9965 6.91E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.996 7.51E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9955 8.49E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.995 8.71E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9945 7.58E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.994 6.51E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9935 5.96E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.993 5.72E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9925 6.07E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.992 6.73E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9915 7.14E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.991 7.36E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9905 7.64E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.99 8.30E-01                   |
| Znach.txt                      | 15.9895 9.03E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.989 9.18E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9885 8.88E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.988 8.20E-01                  |
| Znach.txt                      | 15.9875 6.88E-01                 |
| Znach.txt                      | 15.987 6.07E-01                  |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 10.77441 0.8320003      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 21.54882 -0.1250000     |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 32.32323 -0.2059999     |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 43.09764 0.6830001      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 53.87205 0.5079999      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 64.64646 -0.1430001     |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 75.42087 -6.5199852E-02 |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 86.19528 -0.2379999     |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 96.96970 -3.7199974E-02 |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 107.7441 0.3280001      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 118.5185 -0.1380000     |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 129.2929 -1.3299942E-02 |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 140.0673 0.7430000      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 150.8417 1.3200000      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 161.6162 -7.4500084E-02 |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 172.3906 0.3590002      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 183.1650 0.8200002      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 193.9394 0.3540001      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 204.7138 6.0900211E-02  |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 215.4882 0.6890001      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 226.2626 5.3699970E-02  |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 237.0370 0.3779998      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 247.8114 1.2600000      |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 258.5858 6.6500187E-02  |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 269.3602 -0.1960001     |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 280.1347 4.6500206E-02  |
| Ra= 0.00 Sz= 0.01 L= 16.00.txt | 10.77441 290.9091 -0.1209998     |

Рис.3.16 - Файл профилограммы (слева) и массива точек шероховатости (справа)

### 3.4.2. Метод локальных экстремумов

В основе данного метода лежит выбор локальных экстремумов как основных параметров, характеризующих профилограмму поверхности. То есть, в новый профиль будут переноситься значения, в которых производная шероховатой поверхности будет менять знак. В процессе анализа данных мы выделяем и переносим те значения, в которых произведение разности с последующим и разности с предыдущим имеет отрицательный знак. Т.е.

$$(A[i+1]-A[i]) \cdot (A[i]-A[i-1]) < 0 \quad (3.9)$$

где  $A[i]$  - значение в  $i$  -ой точке.  $A[i-1]$  и  $A[i+1]$  - значение в соседних точках справа и слева соответственно. (Рис.3.17.)

Реализация обоих методов представлена в Приложении в виде текста созданной для этой работы программы. Такая выборка позволяет сохранить основной каркас изначального профиля, выделяя наиболее вероятные точки пересечения с другой поверхностью.

Недостатком данного метода, является недостаточное уменьшение объема данных и всё ещё значительное количество вторичных данных о профиле поверхности. Вследствие чего большое количество точек, полученное после обработки, увеличивает время расчёта КТС, но при этом не увеличивает точность результата.

Практически было определено, что концентрация точек порядка  $n = 120$  т/см, превышение которой не имеет смысла, ввиду малого прироста точности в сравнении с увеличением объема модели. Однако данный критерий является лишь рекомендацией, и при моделировании нужно учитывать величину создаваемой площади и параметр  $R_a$ .

Для сокращения количества точек была предложена дополнительная мера:

Она основана на введении двух линий предела, параллельных линии проведённой из одного локального пика к другому и отстоящих от неё на величину  $+\delta$  и  $-\delta$ . Точки, лежащие в пределах зоны между линиями, т.е. в диапазоне  $2\delta$  учитываться не будут.

Значение дельта задается пользователем и из наблюдений для композитов и керамики рекомендуется брать  $\delta$  равной от  $0,1R_a$  до  $R_a$ . Точнее для каждого случая можно определить этот диапазон исходя из количества выходных точек. Это значение программа выводит в командной строке и при необходимости сокращения данных можно повторно запустить программу, увеличив значение  $\delta$ .



Рис.3.17. Схема используемого дополнительного способа сокращения точек.

Так как от величины  $\delta$  будет зависеть конечный результат вычислений, для объективности ниже будут показаны графики получившихся кривых поверхности и отображены количество точек и, непосредственно, значение  $\delta$ . В качестве примера алгоритма возьмем поверхность с шероховатость  $R_a=2,07$  мкм. (Рис.3.20)

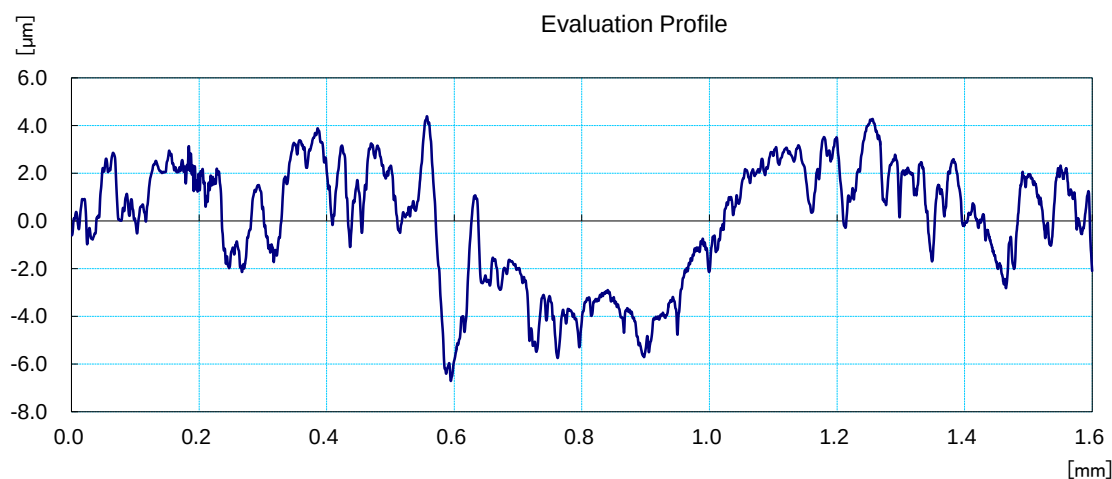


Рис.3.20. Графическое отображение поверхности шероховатостью  $R_a=2,07$

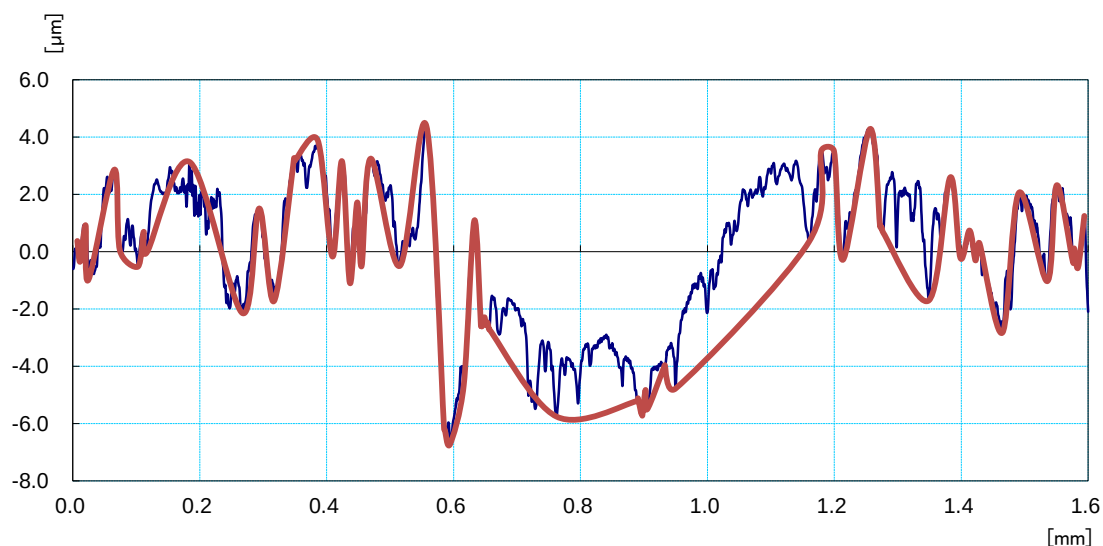


Рис.3.21. Результат обработки профилограммы при  $\delta=1,0Ra$

При параметре 1,0 Ra (рис. 3.21) в результате получаем  $n = 82$  точки, что превышает количество точек  $n=45$ , полученных предыдущим алгоритмом. При увеличении дельта количество точек будет уменьшаться и достигнет величины  $n=45$ . полученной методом алгоритма вершин.

Надо сказать, что при построении кривой использовался автоматический интерполяционный метод, встроенный в excel, что может несколько отличать текущую картину от будущей модели.

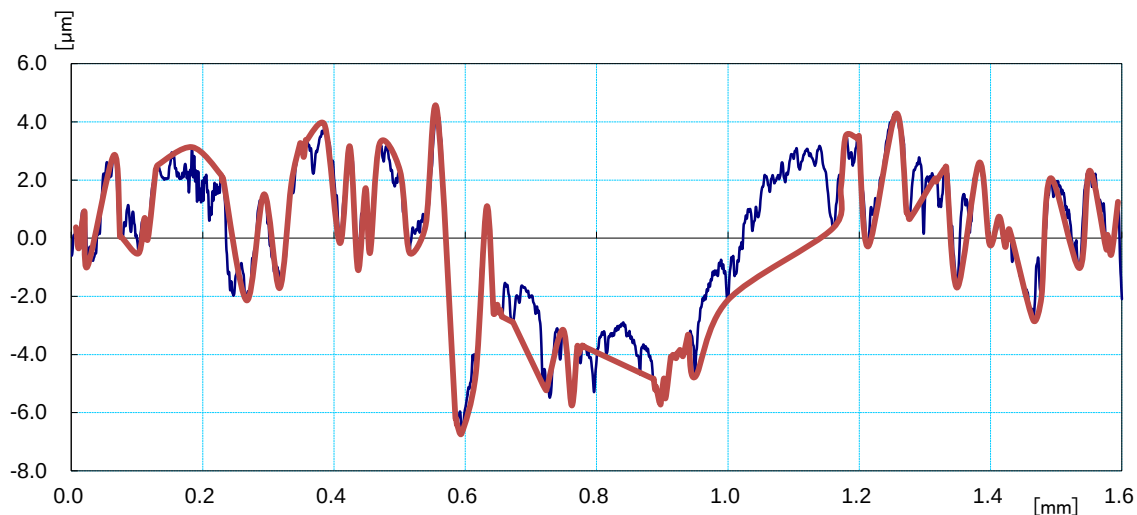


Рис. 3.22. Результат обработки профилограммы при  $\delta=0,75Ra$

Следующее значение  $\delta=0,75Ra$  (рисунок 3.22.) даёт уже сужение с  $n=3200$  начальных точек до  $n=150$ . Такое число точек является вполне приемлемым и в итоге даёт подходящую плотность точек, что не сильно усложняет дальнейший

процесс вычислений. Видно, что в большей степени кривая описывает имеющийся профиль шероховатости, что говорит о сохранении важных точек характеризующих профиль.

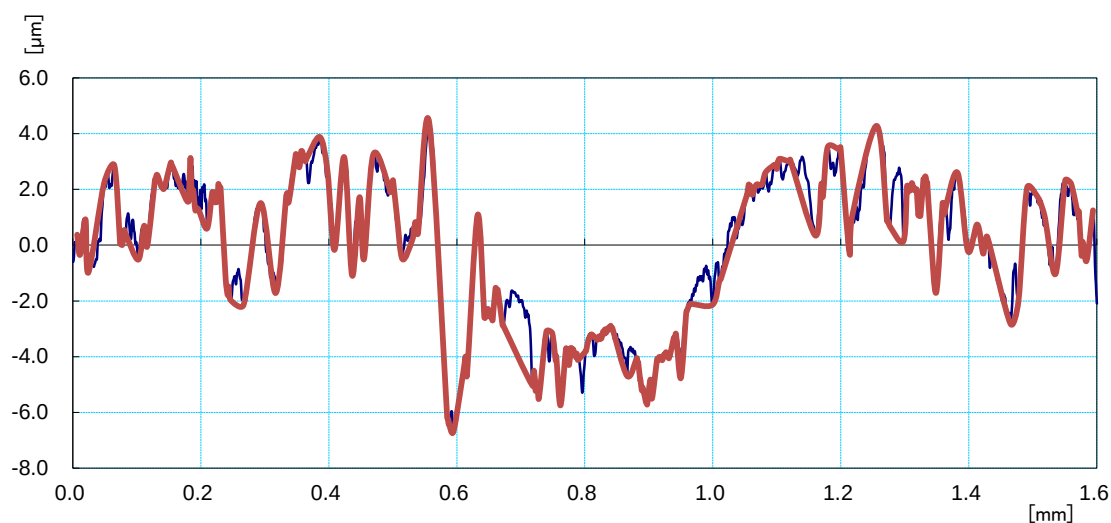


Рис. 3.23. Результат обработки профилограммы при  $\delta=0,4Ra$

Значение параметра  $0,4Ra$  (рисунок 3.23) даёт в данном случае хорошее описание, но при этом сокращает число точек лишь до  $n=321$ , что уже больше оказывает влияние на необходимую вычислительную мощность, так как в дальнейшем, при моделировании поверхности количество описывающих её будет равно квадрату из количества получившихся точек на данном этапе. Так же уже на данном этапе потребуется создание нового метода преобразования облака точек в поверхность, так как используемая в этом проекте программа не способна при имеющейся вычислительной мощности выполнить данную задачу

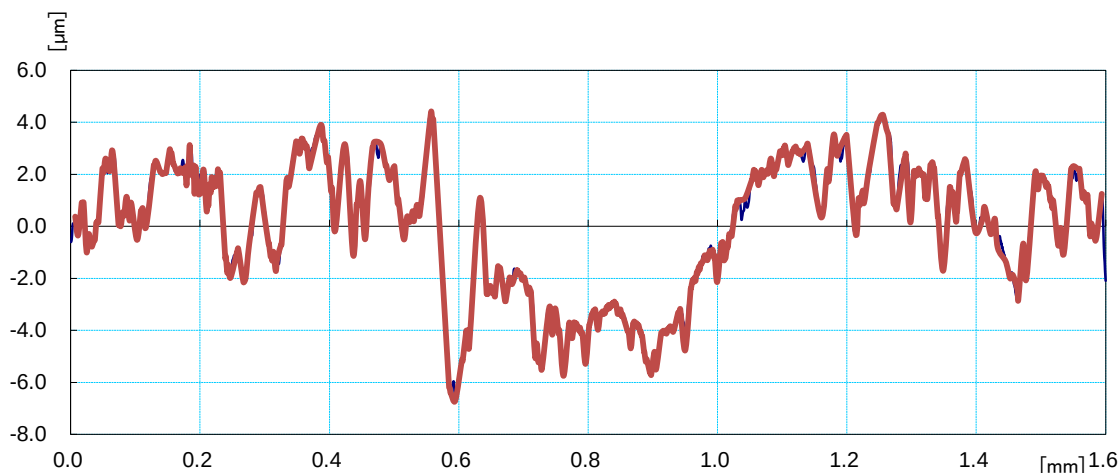
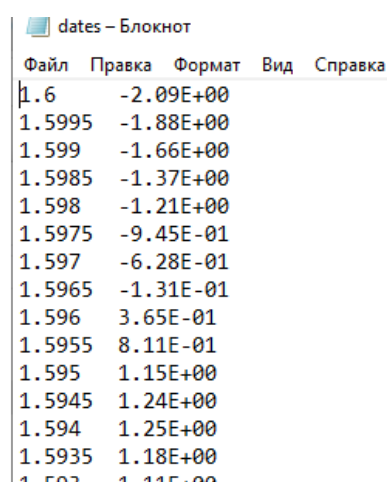


Рис. 3.24. Результат обработки профилограммы при  $\delta=0,1Ra$

В последнем полученном случае (рис. 3.24) при 0,1Ra, получаем кривую почти совпадающую с исходной. Хотя и точность описания здесь является наивысшей, количество выходных точек  $n=584$  всего в  $\approx 5,5$  раз меньше исходных. Вычисления в этом случае должны проводиться на более мощном и дорогом оборудовании.

Ниже в приложении приведён код программы, которая непосредственно отвечает, за данный метод и иллюстрирует алгоритм выполнения процесса обработки. Массив А выполняет роль исходных данных считанных из входного файла dates.txt, а массив С данные полученные с помощью первого метода, т.е. массив локальных вершин и впадин с соответствующими им координатами. Переменные key, i, j являются индексами массивов и отвечают за смену элемента массива. Все приведённые массивы являются двумерными, что делает необходимым наличие второго индекса, но он задаётся в тексте программы.

После обработки полученные массивы данных переписываются в новые трехмерные массивы, описывающие уже геометрическое облако точек. Обработанные точки записываются в случайном порядке без повторений, что обеспечивает будущую модель необходимыми параметрами шероховатости. Так же для сохранения характера исходной кривой запись в новый массив проводится с условиями сохранения среднего шага неровности и ограничения производной. Рост значения в точках не должен превышать максимальное значение производной исходной кривой.



| Файл   | Правка    | Формат | Вид | Справка |
|--------|-----------|--------|-----|---------|
| 1.6    | -2.09E+00 |        |     |         |
| 1.5995 | -1.88E+00 |        |     |         |
| 1.599  | -1.66E+00 |        |     |         |
| 1.5985 | -1.37E+00 |        |     |         |
| 1.598  | -1.21E+00 |        |     |         |
| 1.5975 | -9.45E-01 |        |     |         |
| 1.597  | -6.28E-01 |        |     |         |
| 1.5965 | -1.31E-01 |        |     |         |
| 1.596  | 3.65E-01  |        |     |         |
| 1.5955 | 8.11E-01  |        |     |         |
| 1.595  | 1.15E+00  |        |     |         |
| 1.5945 | 1.24E+00  |        |     |         |
| 1.594  | 1.25E+00  |        |     |         |
| 1.5935 | 1.18E+00  |        |     |         |
| 1.593  | 1.11E+00  |        |     |         |

Рис.3.25. Фрагмент файла исходных данных

| results1 – Блокнот             | results2 – Блокнот             |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Файл Правка Формат Вид Справка | Файл Правка Формат Вид Справка |
| 0 501.333 -2.14                | 0 711.111 -0.499               |
| 0 512 -3.6899                  | 0 746.667 0.376                |
| 0 522.667 2.3601               | 0 782.222 -5.75                |
| 0 533.333 -2.51                | 0 817.778 -0.36                |
| 0 544 -3.75                    | 0 853.333 -0.498               |
| 0 554.667 1.96                 | 0 888.889 -0.553               |
| 0 565.333 -3.38                | 0 924.444 4.39                 |
| 0 576 -4.83                    | 0 960 -0.0677                  |
| 0 586.667 -0.0262              | 0 995.556 2.59                 |
| 0 597.333 -0.498               | 0 1031.11 -0.521               |
| 0 608 -4.0898                  | 0 1066.67 -1.7                 |
| 0 618.667 4.28                 | 0 1102.22 0.922                |
| 0 629.333 0.801                | 0 1137.78 -1.03                |
| 0 640 -4.12                    | 0 1173.33 -2.09                |
| 0 650.667 3.52                 | 0 1208.89 0.0526               |
| 0 661.333 -3.7498              | 0 1244.44 -0.345               |
| 0 672 -2.59                    | 0 1280 1.72                    |
| 0 682.667 -3.94                | 0 1315.56 -1.09                |
| 0 693.333 2                    | 0 1351.11 -2.14                |
| 0 704 3.38                     | 0 1386.67 -2.82                |
| 0 714.667 -5.75                | 0 1422.22 1.08                 |
| 0 725.333 0.922                | 0 1457.78 -0.208               |
| 0 736 -0.288                   | 0 1493.33 2.86                 |
| 0 746.667 2.36                 | 0 1528.89 1.25                 |
| 0 757.333 -2.5098              | 0 1564.44 1.51                 |

Рис. 3.26. Файлы результирующих массивов данных

Из образованного программой массива точек необходимо создать поверхность. Основная сложность в данном случае заключается в выборе метода построения криволинейной поверхности. После проведения анализа по выбору метода построения поверхностей, наиболее подходящий метод в нашем случае – метод сплайновой интерполяции.

Данный метод реализуется путем построения сплайнов через массив точек в направлении оси X и оси Y. В результате получается каркас поверхности из сплайнов, на который накладывается сетка. Пример построения поверхности приведён ниже на рисунках 3.27. и 3.28.

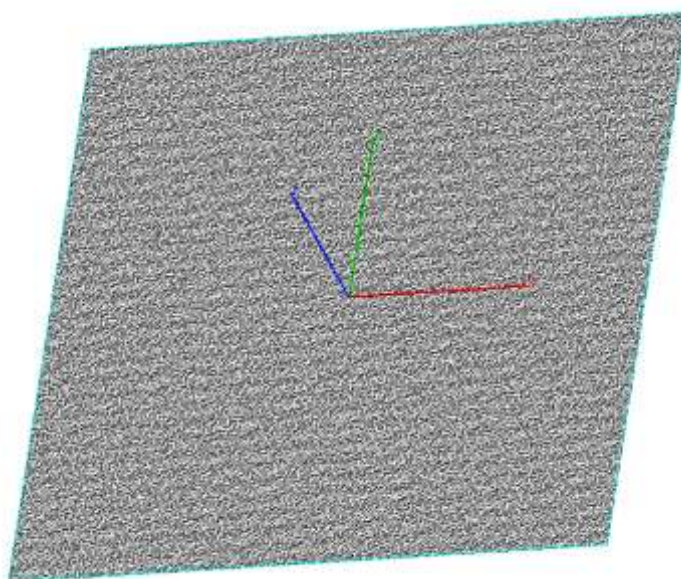


Рис.3.27. Геометрическое облако точек



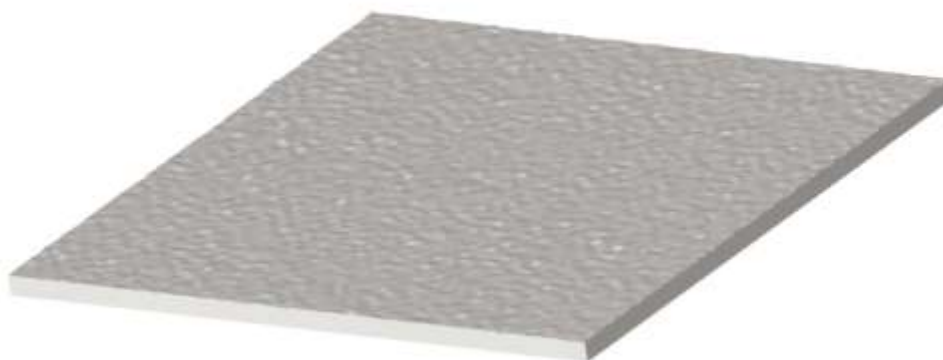


Рис.3.28. Смоделированная шероховатость поверхности  $R_q=0,647$ ,  $L=1\text{ мм}$ .

Для контактной задачи моделировалась вторая поверхность с  $R_a = 0,53$ , которая в дальнейшем помещалась в сборку. Поверхности контакта сближались до интервала 10 мкм (Рис.3.39)

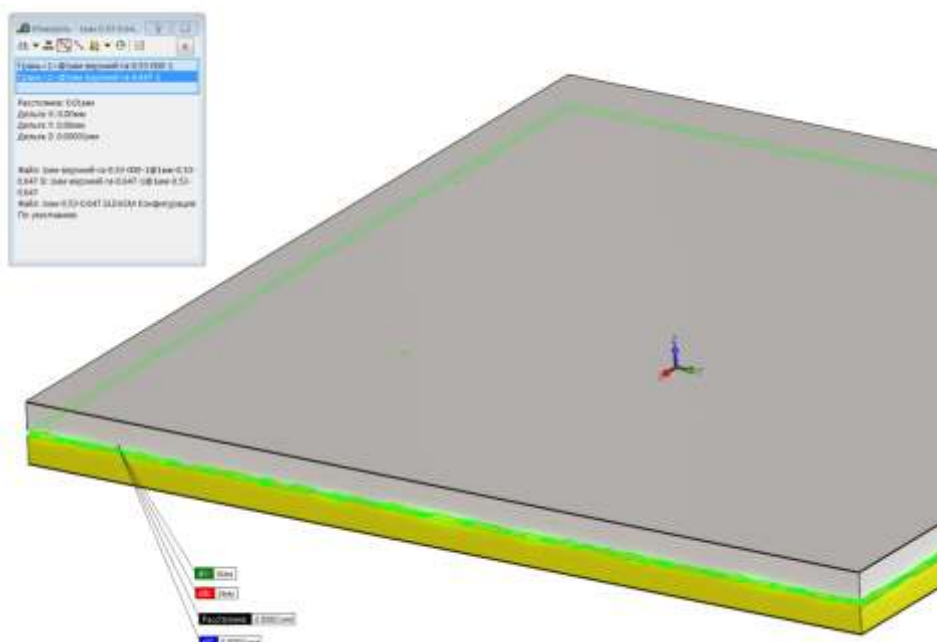


Рис.3.29. Сближение образцов в контактной области.



Таким образом, в результате работы программы моделирования шероховатой поверхности получается контактная пара двух шероховатых поверхностей, отстоящая друг от друга на 10 мкм. Эта контактная пара в дальнейшем может быть использована для расчета на деформацию микровыступов, определения сближения и фактической площади контакта при разных нагрузках, а также для определения изменения межконтактного объема.

В качестве примера результата работы программы, на рисунке 3.30 приведены иллюстрация макета цифрового двойника трехмерной микрогеометрии и фотография реальной поверхности.

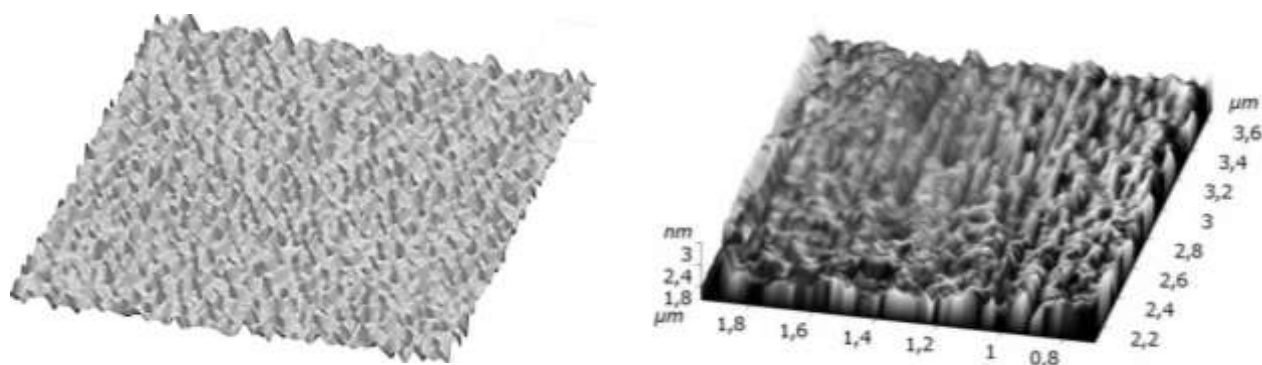


Рис.3.30 Макет цифрового двойника (слева) и фотография (справа) шероховатой поверхности

### 3.5. Моделирование трехмерной топографии на основе теории фракталов.

#### 3.5.1. Построение фрактальной геометрии на основе среднеарифметического отклонения профиля $R_a$ .

Традиционные исследования поверхности, основанные на статистике, в основном используют статистические методы. Из-за влияния точности приборов и длины выборки неточность измеряемых параметров приводит к неточным результатам. С развитием теории фракталов поверхность, описываемая с помощью теории фракталов, становится уникальной, а результаты, полученные в ходе анализа, - более точными.

Концепция фрактала, применительно к задачам микрогеометрии поверхностей, впервые предложена Бенуа Б. Мандельбротом в 1977 году [336]. Фрактальная геометрия стала мощным инструментом для изучения сложных и

нелинейных проблем, находя широкое применение в различных областях, таких как геология, медицина, астрономия и т.д. [337-342]. Она используется для обозначения узора, состоящего из множества ломаных фигур. Предложенная концепция использует масштабно-инвариантные фрактальные метрики для описания морфологии поверхностей, что делает ее отличительным, легко различимым и более эффективным и рациональным подходом по сравнению с обычными статистическими методами.

Авторы [343] провели измерения с контактной парой нержавеющей сталь – алюминиевый сплав и показали, что фрактальная модель удовлетворительно рассчитывает измеренные значения при низком межконтактном давлении.

Фрактальная геометрия обеспечивает основу для описания нерегулярных и хаотических явлений в природе, позволяя нам глубже понять микроскопическую морфологию поверхностей. Интеграция теории фракталов в научные исследования становится все более распространенной, позволяя проводить более глубокий анализ материалов [344,345]. В дополнение к традиционным статистическим показателям, таким как  $R_a$ ,  $R_q$  и  $R_z$ , методы фрактальной геометрии могут быть использованы для количественной оценки геометрических свойств поверхностей соединений. Эти методы позволяют получить всестороннюю характеристику рельефа поверхности и обладают значительным потенциалом для применения в исследованиях материалов и инженерии поверхностей. Фрактальная поверхность представляет собой стохастический процесс, характеризующийся статистическим самоподобием и сродством к себе, отражающий присущую фрактальному объекту однородность и процесс его преобразования.

Объекты, изучаемые фрактальной геометрией, обладают бесшкальными линиями и самоподобием. Под безмасштабностью понимается форма, сложность и нерегулярность фигуры после ее уменьшения или увеличения. Шероховатая поверхность, при определенном увеличении всегда будет иметь сложную и нерегулярную морфологию поверхности, как показано на рисунке 3.31:

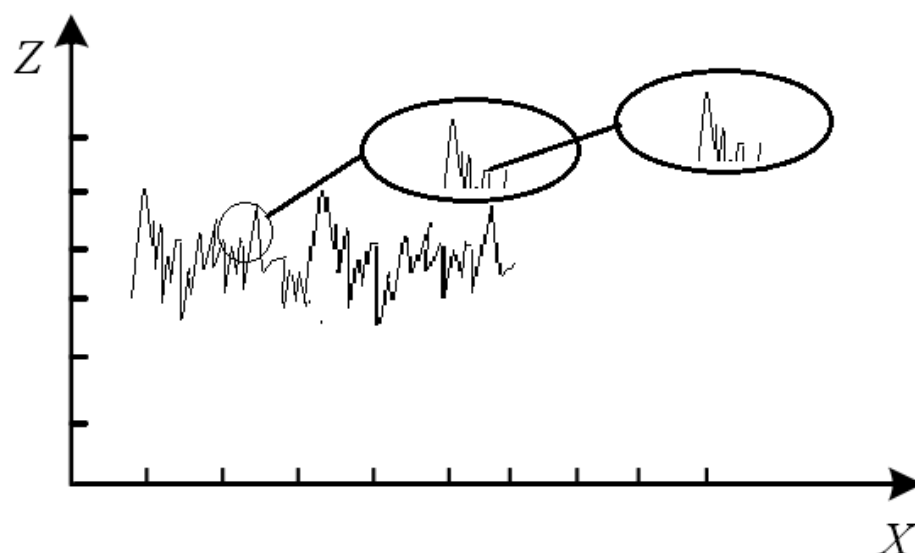


Рис. 3.31 Фрактальная морфология шероховатой поверхности

Функция W-М была создана немецким математиком Вейерштрассом в 1870-х годах. В 1991 году М. Маджумдар и Б. Бхуша на основе базовой функции, в сочетании с применением реальной техники и микроскопических характеристик структуры, она была модифицирована [346].

Фрактальная геометрия обеспечила новый подход к описанию морфологии обработанных поверхностей. Фрактальная размерность, как важная концепция в этой области, может количественно представлять сложность геометрических форм. Фрактальная размерность - это числовой показатель, который измеряет и описывает масштаб, и это важный параметр для характеристики фрактальных поверхностей. [347] Вычисление фрактальной размерности имеет решающее значение для применения теории фракталов на практике. В настоящее время существует два основных метода вычисления фрактальной размерности: D.

В первом случае - это соотношение между двумерной размерностью контура поверхности,  $D_L$ , и трехмерной фрактальной размерностью поверхности, D, береговой линии, как предложено в исследовании Мандельброта, где  $D_L = D - 1$ . Двумерная фрактальная размерность обработанной поверхности равна фрактальной размерности поверхности. Используя формулу  $D = D_L + 1$ , мы можем вычислить фрактальную размерность (D) трехмерной поверхности, где  $D_L$  представляет собой фрактальную размерность профиля поперечного сечения в

определенном направлении. Однако большинство обрабатываемых поверхностей являются анизотропными, например, шлифованные и фрезерованные поверхности. Эти поверхности имеют разные фрактальные размеры в разных местах и направлениях.. В результате трудно определить, какой профиль поперечного сечения и направление измерения точно соответствуют поверхности. Это, в свою очередь, приводит к неточной оценке фрактальной размерности анизотропных поверхностей на основе двумерного фрактального профиля.

Вторая идея состоит в том, чтобы избежать этой ошибки, вычислив фрактальную размерность поверхности непосредственно по данным о поверхности. С момента появления теории фракталов были разработаны различные методы для непосредственного вычисления фрактальных размеров поверхности, такие как дифференциальный подсчет квадратов (DBC), площадь треугольной призмы (TPSA) и методы структурных функций. Хотя эти методы используют данные о поверхности для непосредственного вычисления трехмерных фрактальных размеров (D), они все еще имеют ограничения [348,349]. Многие ученые проводили исследования, направленные на совершенствование методов расчета фрактальных размерностей и изучение их применения. Например, Наяк и др. [350] исследовали применение этих методов в различных областях, таких как геология, биология и материаловедение. Ли и др. [351] предложили новый метод под названием FFP, который сочетает в себе быстрое преобразование Фурье (FFT) и фрактальную размерность Хигучи (HFD). Этот метод обладает хорошей производительностью при описании структуры и сложности последовательностей. Флорио и др. [352] использовали метод определения периметра и площади для вычисления фрактальной размерности агрегатов, доказывая важность различия между собственными значениями и собственными векторами при измерении фрактальной площади периметра. Однако низкая точность является распространенной проблемой в современных методах расчета фрактальных размеров поверхности.

Более того, процесс вычисления фрактальной размерности непосредственно по данным о поверхности основан на теории фракталов и предполагает

использование специальных математических методов. Такой подход приводит к сложным расчетам и трудоемким процедурам. Кроме того, существует множество неопределенностей, связанных с этим методом прямого расчета, что приводит к изменению расчетных значений фрактальной размерности в зависимости от условий измерения. Исследователи сталкиваются с серьезной проблемой в точном определении фрактальной размерности (D) по данным о поверхности без каких-либо промежуточных этапов. Чтобы преодолеть эти трудности, крайне важно разработать более эффективный метод расчета трехмерных фрактальных размеров с повышенной точностью и надежностью. Чтобы повысить точность вычислений фрактальных размеров, в этом исследовании было проведено всестороннее исследование фрактальных поверхностей с помощью теоретических, имитационных и эмпирических исследований. Был предложен новый подход к определению фрактальных размеров с использованием средней арифметической высоты поверхности.

В настоящее время существует несколько подходов к описанию фрактальных поверхностей, включая фрактальное броуновское движение, фрактальные функции Вейерштрасса–Мандельброта, метод Монте-Карло и другие [345,353]. Из этих моделей наиболее широко используется функция Вейерштрасса–Мандельброта. В этой работе выбрана функция Вейерштрасса–Мандельброта в качестве основы для вычислительного метода. Фрактал Вейерштрасса–Мандельброта используется для моделирования кривой профиля шероховатой поверхности, которая обладает фрактальными характеристиками. Эта функция обладает свойствами непрерывности и недифференцируемости во всей своей области и может быть выражена следующим образом:

$$z(x) = L \left( \frac{G}{L} \right)^{D-1} \sum_{n=0}^{\infty} \gamma^{-(2-D)n} \cos \left( 2\pi \gamma^n \frac{x}{L} \right) \quad (3.10)$$

Где  $z(x)$  обозначает высоту профиля неровной поверхности,  $x$  представляет координату вдоль смещения этой поверхности, а  $D$  ( $1 \leq D \leq 2$ ) обозначает фрактальную размерность этого профиля. Кроме того,  $n$  представляет собой частотный индекс,  $G$  - характерный масштабный коэффициент,  $L$  - длину

выборки, а  $\gamma$  - постоянное значение, превышающее 1. Если значение  $\gamma$  равно 1,5, можно гарантировать, что контурная кривая изрезанного профиля будет иметь случайный характер и мощный спектр. Пространственная частота ( $Y = 1 / L$ ) профиля связана с длиной выборки. Фрактальная размерность служит показателем, характеризующим сложность и неровность поверхности. В то же время характерный масштабный коэффициент служит для описания высоты контура поверхности. Ауслус и др. в своем исследовании [354] углубились в сложную область фрактальных характеристик, присущих трехмерным поверхностям. Основываясь на концепции двумерной кривой, они расширили ее, создав трехмерную волнообразную поверхность, обозначенную как W-M. Математическое выражение этой поверхности можно сформулировать в виде:

$$z(x, y) = \left(\frac{\ln \gamma}{M_s}\right)^{1/2} \sum_{m=1}^{M_s} A_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ 1 - \cos(k_0 \gamma^n (x^2 + y^2)^{1/2}) \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \alpha_m\right) \right] \times \cos(\varphi_{m,n}) (k_0 \gamma^n)^{D-3} \quad (3.11)$$

В контексте анализа поверхности высота поверхности в заданной координате  $(x, y)$  может быть обозначена как  $z(x, y)$ , где  $z$  представляет собой значение высоты. Нормализованный коэффициент  $\ln(\gamma)$ , где  $\gamma$  является параметром масштаба, определяет частотное распределение поверхности. Обычно значение  $\gamma$  равно 1,5, что отражает гладкость и частотную плотность поверхности.  $M_s$  представляет собой количество перекрывающихся складок на поверхности, в то время как  $A_m$  обозначает амплитуду, которая остается постоянной для изотропных поверхностей, но изменяется в зависимости от направления для анизотропных поверхностей. Частотный индекс  $n$  используется для количественной оценки изменения уровня, а  $k_n$  указывает величину этого изменения.  $a_m$  представляет степень волнистости поверхности в определенном направлении в диапазоне от 0 до  $\pi$ , в то время как  $\varphi$  представляет случайную фазу в диапазоне от 0 до  $2\pi$ . Фрактальная размерность  $D$  поверхности находится в диапазоне от 2 до 3. В традиционных процессах обработки поверхности можно разделить на изотропные и анизотропно изменяющиеся в зависимости от их

отличительных характеристик.. Определение характеристик этих двух типов поверхностей микроскопического размера основано на различных методологиях, основанных на теории фракталов. Фрактальная геометрия очерчивает неправильные конфигурации, однако однородность этих форм остается неизменной в различных масштабах, обнаруживая поразительное сходство между локальным и глобальным.

Это аналогично характеристикам изотропной поверхности [355]. Комвопулос [356] и др. преобразовали функцию W-M, введя параметр длины G.  $A_m$  был определен как:

$$A_m = A = 2\pi(2\pi/G)^{(2-D)}; k_0 = 2\pi/L; a_m = \pi m/M_s \quad (3.12)$$

На практике самыми низкими и самыми высокими частотами являются  $1/L$  и  $1/L_s$  соответственно. Индекс частоты  $n$  принимает диапазон  $[n_{\min}, n_{\max}]$ , где  $n_{\min}=0$ ,  $n_{\max}=\text{int}[\log(L/L_s)/\log \gamma]$ , где  $\text{int}[*]$  - это функция округления. На данном этапе, подставив эти переменные в уравнение 3.11, мы можем получить выражение для изотропной поверхности W-M.

$$z(x, y) = L \left(\frac{G}{L}\right)^{D-2} \left(\frac{\ln \gamma}{M_s}\right)^{1/2} \sum_{m=1}^{M_s} \sum_{n=n_l}^{n_{\max}} \gamma^{(D-3)n} \left\{ \cos \varphi_{m,n} - \cos \left[ \frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{1/2}}{L} \cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} \right) + \varphi_{m,n} \right] \right\} \quad (3.13)$$

где  $G$  - параметр фрактальной шероховатости, который связан с фактической высотой поверхности.  $L$  - длина выборки, а  $L_s$  - длина пересечения.  $n$  - частотный индекс,  $n_{\max}$  - самая высокая частота, а  $n_l$  - самая низкая частота. Эта функция высоты поверхности позволяет нам создавать изотропные поверхности с самостоятельной привязкой, такие как поверхности электроэрозионной обработки, поверхности, обработанные пескоструйной обработкой, и поверхности с электроосаждением. Согласно уравнению 3.13, можно сгенерировать поверхности W-M с различными размерами ( $D$ ), используя следующие параметры:  $G=1,36 \times 10^{-11}$ ,  $\gamma=1,5$ ,  $M=10$ ,  $n_{\max}=20$ ,  $L=0,001$ . Результаты показаны на рисунке 3.32.

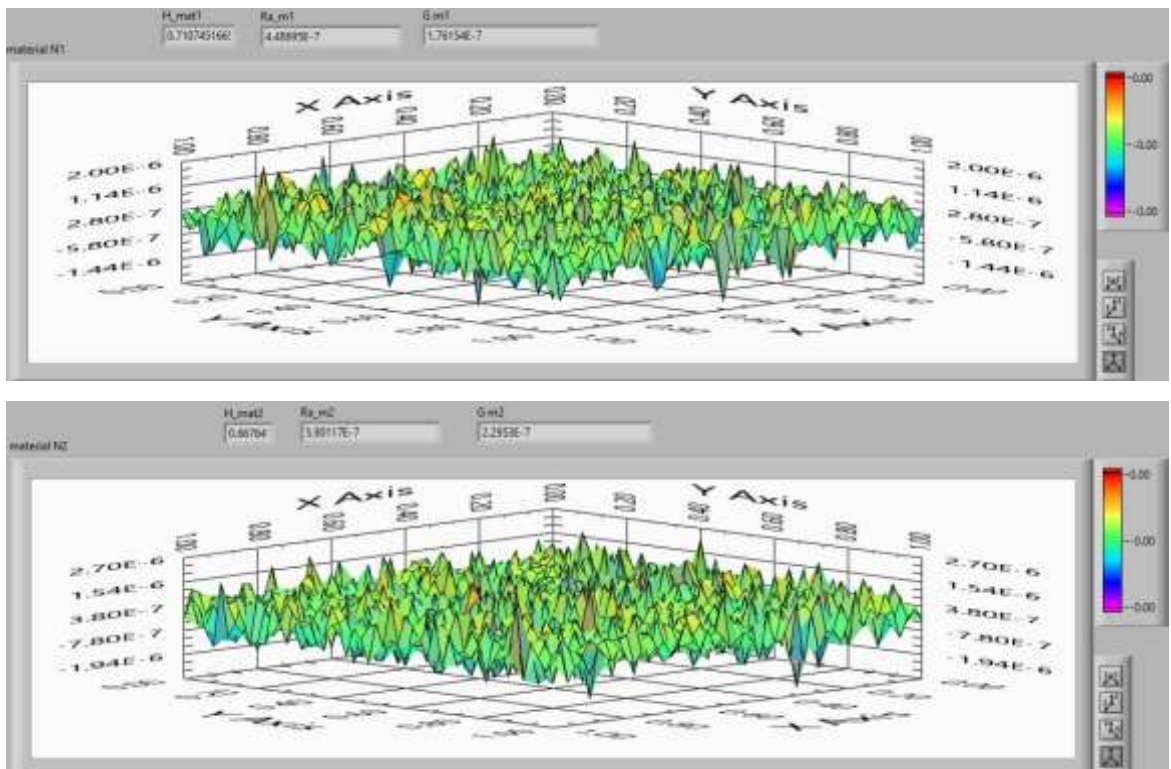


Рис. 3.32. Моделирование W-M фрактальных поверхностей с различной фрактальной размерностью.

Результаты существующих исследований показывают, что конфигурации рисунков, канавок и углублений, остающихся на поверхности после обработки различными станками, проявляют как изотропный, так и анизотропный характер. В отличие от изотропных поверхностей, которые обладают одинаковыми свойствами во всех направлениях, анизотропные поверхности имеют четкие фрактальные размеры вдоль разных осей. Большинство обработанных поверхностей, таких как поверхности, полученные в результате токарной обработки, фрезерования и шлифования, обладают анизотропией.[357] Для анизотропных поверхностей, характеризующихся определенной фрактальной размерностью ( $D$ ), можно использовать два подхода для их создания. Один из методов использует тот факт, что фрактальные размеры на взаимно перпендикулярных анизотропных плоскостях демонстрируют лишь слабую корреляцию. Следовательно, фрактальная размерность морфологии поверхности, обозначаемая как  $D$ , может быть вычислена из значений  $D_1$  и  $D_2$ , представляющих собой фрактальные размеры ортогональных контуров на обрабатываемой поверхности, используя уравнение  $D=D_1+D_2$ . Для анизотропной фрактальной



поверхности, характеризующейся определенным фрактальным размером ( $D$ ), анизотропная поверхность может быть построена путем растягивания фрактального профиля вдоль прямой линии. Чтобы проиллюстрировать эту концепцию, рассмотрим фрактальную кривую W-M, изображенную на рисунке 3.33 (а), которая имеет фрактальную размерность ( $D_L$ ), равную 1,5. На рисунке 3.33(б) представлена анизотропная поверхность, полученная путем растягивания профиля W-M в направлении оси  $y$ . Поскольку размерность линии равна единице, результирующая трехмерная фрактальная поверхность имеет размерность  $D$ , равную 2,5. Этот подход может быть использован для моделирования поверхностей, которые были отфрезерованы или отшлифованы.

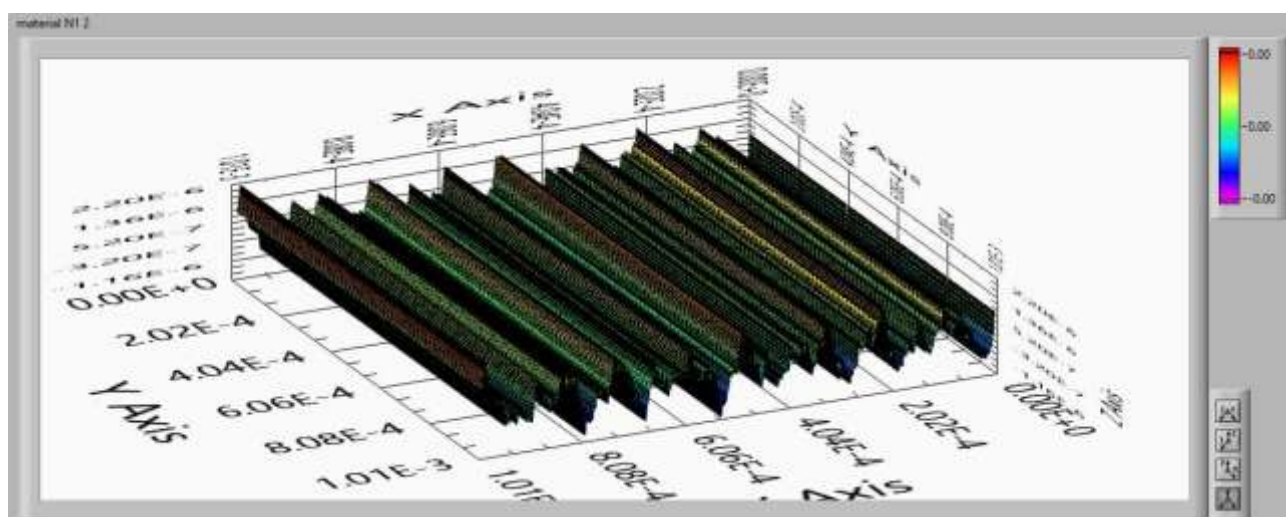


Рис.3.33. (а) Фрактальная кривая W-M, когда  $D_L$  равна 1,5 (б) Растянутая фрактальная поверхность, состоящая из W-M профиля и линейной оси  $Y$

Второй подход к созданию анизотропных поверхностей заключается в повороте кривой W-M вокруг определенной оси. Для иллюстрации, если повернуть тот же W-M профиль вокруг оси  $Z$ , может быть создана анизотропная поверхность, как показано на рисунке 3.34. В этой конфигурации двумерные фрактальные размеры профиля поверхности вдоль радиальной и тангенциальной осей равны 1,5 и 1 соответственно. Следовательно, трехмерная фрактальная размерность результирующей поверхности равна 2,5, что делает ее пригодной для моделирования торцевой поверхности с точением.

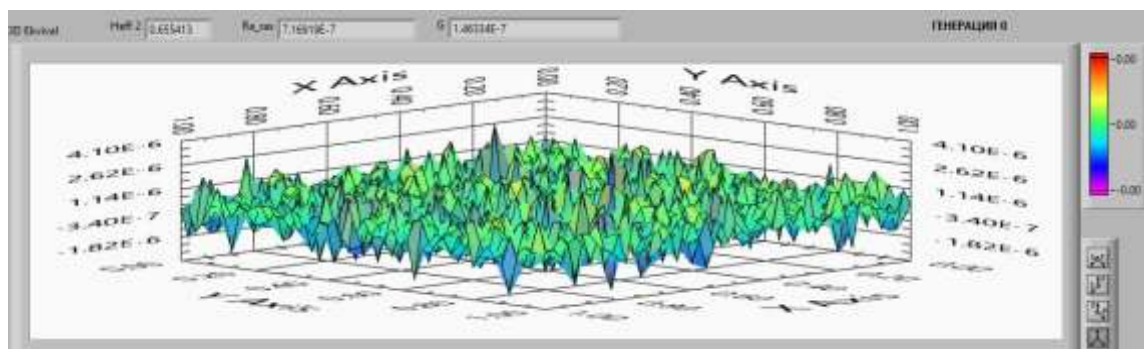


Рис. 3.34. Анизотропная поверхность, полученная при вращении профиля W-M вокруг оси Z

Чтобы исследовать корреляцию между фрактальной размерностью ( $D$ ) и параметрами трехмерной поверхности, используется MATLAB для создания фрактальных поверхностей с различными значениями  $D$ . Результаты расчета их стандартных параметров поверхности как для изотропных, так и для анизотропных поверхностей приведены в таблицах 3.1 и 3.2 соответственно. Для изотропных поверхностей, средняя арифметическая высота поверхности ( $R_a$ ) и среднеквадратичная высота ( $R_q$ ) постепенно уменьшаются по мере увеличения  $D$ . Максимальная высота ( $R_p$ ), самая глубокая высота ( $R_v$ ) и максимальное значение высоты ( $R_z$ ) приближаются к 0, в то время как последнее постепенно уменьшается. В отличие от этого, для анизотропных поверхностей значения  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_p$  и  $R_v$  уменьшаются по мере увеличения фрактальной размерности  $D$ , в то время как  $R_z$  остается постоянным. При одинаковой фрактальной размерности значения  $R_a$ ,  $R_q$  и  $R_p$  для изотропных поверхностей больше, чем для анизотропных. Это свидетельствует о сильной корреляции между фрактальной размерностью и обычными параметрами поверхности, которая справедлива как для изотропных, так и для анизотропных случаев. Этот анализ показывает, что особенности микроповерхностных объектов теоретически могут быть охарактеризованы с помощью фрактальной размерности.

Таблица 3.1. Поверхностные параметры изотропных поверхностей  
( $G=1,36 \times 10^{-5}$ , единица измерения: мкм)

| D   | R <sub>a</sub> | R <sub>q</sub> | R <sub>p</sub> | R <sub>v</sub> | R <sub>z</sub> |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2.1 | 1.08E+04       | 1.43E+04       | 4.07E+04       | -3.87E+04      | 7.94E+04       |
| 2.2 | 1.85E+03       | 3.00E+03       | 7.61E+03       | -1.09E+04      | 1.85E+04       |
| 2.3 | 3.18E+02       | 8.01E+02       | 1.39E+03       | -2.28E+03      | 3.66E+03       |
| 2.4 | 5.38E+01       | 7.54E+01       | 1.90E+02       | -1.80E+02      | 3.70E+02       |
| 2.5 | 9.21E+00       | 1.26E+01       | 4.07E+01       | -3.19E+01      | 7.26E+01       |
| 2.6 | 1.49E+00       | 1.98E+00       | 7.89E+00       | -6.72E+00      | 1.46E+01       |
| 2.7 | 2.69E-01       | 3.37E-01       | 1.22E+00       | -1.34E+00      | 2.55E+00       |
| 2.8 | 4.45E-02       | 6.77E-02       | 1.76E-01       | -1.67E-01      | 3.44E-01       |
| 2.9 | 7.56E-03       | 2.12E-02       | 3.11E-02       | -5.55E-02      | 8.65E-02       |

Таблица 3.2. Поверхностные параметры анизотропных поверхностей  
( $G=1,36 \times 10^{-5}$ , единица измерения: мкм)

| D   | R <sub>a</sub> | R <sub>q</sub> | R <sub>p</sub> | R <sub>v</sub> | R <sub>z</sub> |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2.1 | 2.08E-01       | 4.51E-01       | 5.10E-01       | -9.53E-02      | 6.05E-01       |
| 2.2 | 7.12E-02       | 9.54E-02       | 1.74E-01       | -1.95E-01      | 3.69E-01       |
| 2.3 | 2.53E-02       | 4.27E-02       | 4.44E-02       | -1.54E-02      | 5.97E-02       |
| 2.4 | 7.58E-03       | 1.05E-02       | 2.05E-02       | -1.50E-02      | 3.55E-02       |
| 2.5 | 2.47E-03       | 3.10E-03       | 6.26E-03       | -7.44E-03      | 1.37E-02       |
| 2.6 | 9.01E-04       | 1.23E-03       | 2.06E-03       | -2.61E-03      | 4.67E-03       |
| 2.7 | 3.13E-04       | 5.97E-04       | 6.77E-04       | -1.17E-03      | 1.77E-03       |
| 2.8 | 9.15E-05       | 1.25E-04       | 2.27E-04       | -1.91E-04      | 4.17E-04       |
| 2.9 | 3.21E-05       | 4.55E-05       | 7.48E-05       | -1.14E-04      | 1.88E-04       |

Существующие методы расчета фрактальных размеров часто характеризуются сложными вычислениями и существенными ограничениями. Метод DBC, в частности, основан на измерении количества квадратов между максимальной и минимальной высотами поверхности. Однако на этот подход может существенно повлиять размер выбранных квадратов, что потенциально может привести к недооценке фрактальной размерности D [358]. Метод Тор

Surface Area (TSA) вычисляет площадь поверхности трехмерного объекта путем суммирования площадей четырех треугольников, которые образованы высотами углов и интерполированными центральными точками. Этот метод рассматривает контурную кривую как временной ряд, разделяя данные на группы на основе экспоненциальных степеней двойки и вычисляя данные между этими группами. Однако из-за ограниченного числа временных рядов, доступных для экспоненциальной функции, и высоких требований к вычислениям точность метода TSA не особенно высока, а связанные с этим вычисления являются сложными. [359] Учитывая ограничения и характеристики существующих методов расчета, существует необходимость в разработке более точного и простого метода определения фрактальных размеров. Исследуя взаимосвязь между существующими параметрами трехмерной поверхности и фрактальными размерами, можно создать простой и точный вычислительный метод. Фрактальная функция W-M служит инструментом для моделирования кривой профиля поверхности, обладающей фрактальными свойствами. Это функция, которая является непрерывной и нигде не дифференцируемой. Чтобы использовать эту функцию, необходимо определить две переменные, обозначаемые как  $x_i$  и  $y_i$ , где  $z(x_i, y_i)$  представляет собой высоту средней плоскости в данной точке. [360] Установив систему координат с центром в точках  $(x_i, y_i)$ , можно проанализировать точки данных, расположенные на поверхности. Следовательно, среднеквадратичный прирост фрактальной поверхности W-M может быть выражен следующим образом:

$$\begin{aligned} R(\Delta x, \Delta y) &= E(|z(x + \Delta x, y + \Delta y) - z(x, y)|^2) \\ &= E(|z(\Delta x, \Delta y) - z(0,0)|^2) = E(|z(\Delta x, \Delta y)|^2) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  - изменения в направлениях  $x$  и  $y$ , соответственно, и среднее значение данных, Блэкмор и др. [361] пришли к выводу, что среднеквадратичное изменение соответствует степенной зависимости.

$$R(\Delta x, \Delta y) \sim \left( \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \right)^{2(3-D)} \quad (3.15)$$

В соответствии с определением среднеквадратичного приращения  $Var(\Delta x, \Delta y)$  приращение поверхности может быть выражено следующим образом

$$Var(\Delta x, \Delta y) = E\{|z(\Delta x + \Delta y) - z(\Delta x, \Delta y)|^2\} \sim \left(\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}\right)^{6-2D} \quad (3.16)$$

Таким образом, среднеквадратичный размер фрактальной поверхности [30] может быть выражен в виде уравнения 3.17

$$V(\Delta x, \Delta y) = Var(\Delta x, \Delta y)^{1/2} \sim \left(\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}\right)^{3-D} \quad (3.17)$$

Среднеквадратичное значение - это статистический показатель, представляющий собой среднее значение квадратов значений в наборе данных. Он рассчитывается путем вычисления квадрата каждого значения в данных, их сложения и последующего извлечения квадратного корня из суммы. Это дает единое значение, которое отражает основную тенденцию данных.

Чтобы вычислить фрактальную размерность и среднее арифметическое отклонения профиля, необходимо использовать выражение для среднеквадратичной оценки с промежуточной фрактальной размерностью. Это выражение представлено в уравнении 3.18:

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} V(\Delta x, \Delta y) d\Delta x d\Delta y \\ &= \frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \left(\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}\right)^{3-D} d\Delta x d\Delta y \end{aligned} \quad (3.18)$$

Для точек данных на поверхности площадь, состоящая из  $l_x$  и  $l_y$ , может быть эквивалентна окружностям с радиусом  $L$  на длине выборки. Тогда выражение  $R_a$  после выполнения полярного преобразуется в уравнение 3.19.

$$R_a = \frac{1}{\pi L^2} \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\sqrt{r^2}\right)^{3-D} r dr d\theta \quad (3.19)$$

После упрощения, получаем уравнение 3.20.

$$R_a = \frac{1}{\pi L^2} \frac{2\pi}{5-D} L^{5-D} = \frac{2L^{3-D}}{5-D} \quad (3.20)$$

Среднеквадратичное значение  $R_a$  в приведенном выше уравнении соответствует степенной зависимости от его приращения. Однако большинство

значений параметров при подборе функции W-M с использованием степенной зависимости игнорируются, что приводит к числовым отклонениям при вычислении значений  $D$  с использованием  $R_a$  или обратного вычисления. Подробные расчеты с использованием уравнения 3.20 и анализ результатов показаны на рисунке 3.35. Первоначально для получения точного значения  $R_a$  была сформулирована поправка в виде уравнения 3.21.

$$\ln(R_a) = k \ln(LR_a) + b \quad (3.21)$$

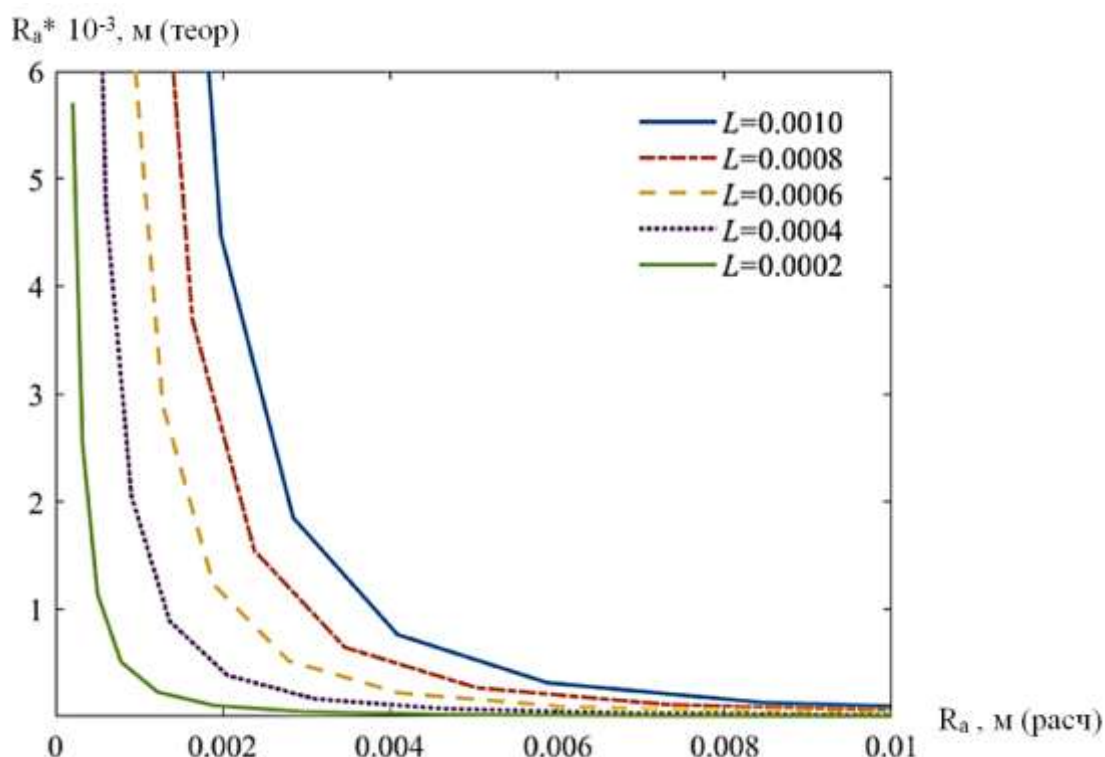


Рис. 3.35. Расчетные значения  $R_a$  при различных  $L$

Из уравнения 3.21 видно, что существует степенная зависимость между вычисленным значением исходной формулы, обозначенным в уравнении как  $L \cdot R_a$ , и теоретическим значением  $R_a$  при различных значениях  $L$ . После применения логарифмического преобразования становится очевидной сильная линейная корреляция. Следовательно, параметр  $L$  служит определителем параметров наклона ( $k$ ) и пересечения ( $b$ ) в уравнении логарифмической коррекции.

Чтобы определить значения этих параметров, проведено 100 вычислений с использованием различных длин выборок. Начальный размер шага был

установлен равным 0,0001 м, и был реализован процесс оптимизации для уточнения значения  $b$ . Результаты этого процесса оптимизации как для  $b$ , так и для  $L$  были сведены в уравнение 3.22, демонстрирующее превосходную стабильность и оптимальную корреляцию.

$$b = -16.99L^{0.003671} \quad (3.22)$$

В связи с тем, что угол наклона  $k$  оказывает большее влияние на формулу, чем угол пересечения  $b$ , и учитывая преимущества различных методов решения в практическом применении, разработаны три подхода к определению угла наклона  $k$ .

Первый подход предполагает полиномиальную аппроксимацию наклона  $k$  и длины выборки  $L$  в логарифмической области. Эта полиномиальная аппроксимация первого порядка эффективна для наборов данных с небольшим объемом и простыми взаимосвязями. Кроме того, модель линейной регрессии обеспечивает прозрачность и облегчает принятие решений. Результаты вычислений представлены на рисунке 3.36.

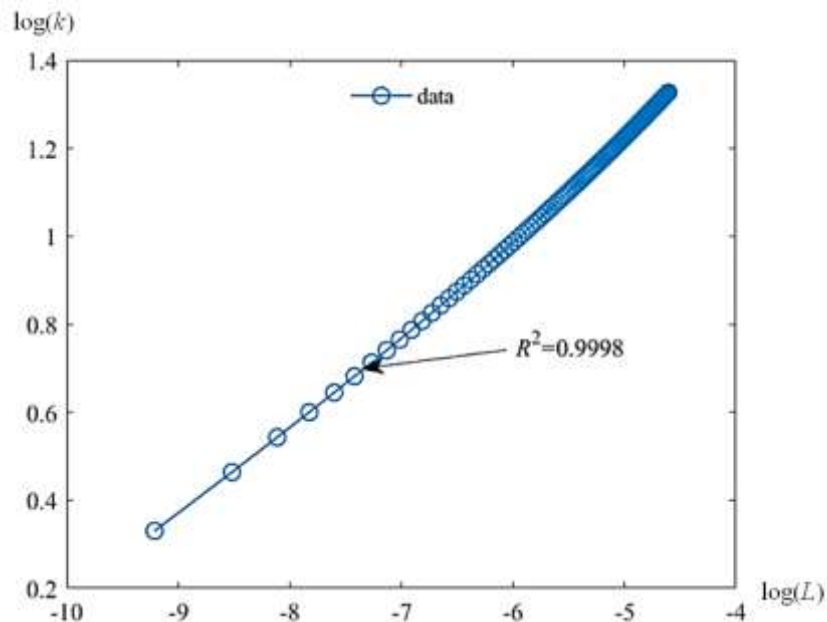


Рис.3.36. Полиномиальная аппроксимация наклона  $k$  и длины выборки  $L$  в логарифмической области

Путем аппроксимации данных можно получить следующее соотношение, как показано в уравнении 3.23.

$$\log(k) = 0.2248 \log(L) + 2.346 \quad (3.23)$$

Из рис. 3.36 видно, что в целом качество подбора цифровых коэффициентов удовлетворительное. Точность коэффициента корреляции составляет 0,9998. Однако при большом или малом значении  $L$  могут наблюдаться определенные отклонения. После упрощения получаем уравнение 3.24.

$$R_a = A_1 \left( \frac{2L^{3-D}}{5-D} \right)^{B_1}, \quad (3.24)$$

где  $A_1$  и  $B_1$  - поправочные коэффициенты, связанные с  $L$ ,

$$A_1 = \exp(-16.99L^{0.003671}),$$

$$B_1 = \exp(2.346L^{0.2248}),$$

значение фрактальной размерности  $D$  инвертируется и затем корректируется с использованием корректирующей формулы.

$$R_a = A_1 \left( \frac{2L^{3-(m_1D+n_1)}}{5-(m_1D+n_1)} \right)^{B_1}, \quad (3.25)$$

где  $m_1 = -1.067$  и  $n_1 = 5.968$ , точность схемы выбора может быть измерена по величине скорректированного наклона  $m$  и пересечению  $n$ . Однако, с другой стороны, это закладывает основу для второго пересмотра, как показано в варианте 2.

Преимущество первого варианта заключается в том, что он дает стабильные результаты при аппроксимации  $k$  к  $L$  и  $b$  к  $L$ , но недостатком является то, что аппроксимация  $L$  к  $k$  не очень точная, что приводит к необходимости большей числовой коррекции к  $m$  и  $n$ .

Для решения этих проблем разработан второй вариант, который включает в себя установку  $k$  на  $L$  (рис. 3.37).



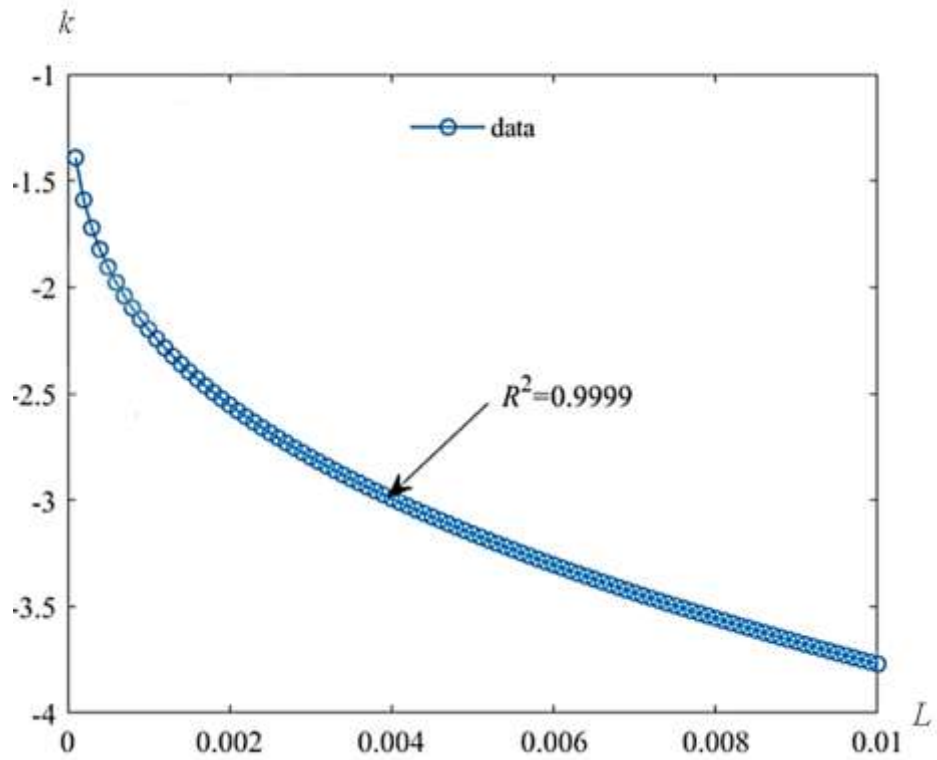


Рис. 3.37: Силовая аппроксимация наклона  $k$  и длины выборки  $L$  в логарифмической области.

После численной коррекции обратного решения может быть получено уравнение 3.26.

$$R_a = A_2 \left( \frac{2L^{3-(m_2 D + n_2)}}{5-(m_2 D + n_2)} \right)^{B_2}, \quad (3.26)$$

где  $A_2$  и  $B_2$  - поправочные коэффициенты, связанные с  $L$ ,

$$A_2 = \exp(-16.99L^{0.003671}),$$

$$B_2 = -10.84L^{0.2317},$$

$$m_2 = 1.102 \text{ и } n_2 = -0.06399.$$

По сравнению с первым решением, второе решение демонстрирует более высокий уровень точности в своих расчетах. В процессе преобразования решения  $D$  через  $R_a$  результирующее значение  $D$  становится ближе к его фактическому значению, в то время как  $m_2$  и  $n_2$  приближаются к 1 и 0 соответственно. Тем не менее, недостатком этого подхода является то, что он приводит к повышенной вариабельности модифицированного соответствия по сравнению с исходным.

Чтобы решить эту проблему, в третьем варианте применяется разложение в ряд Фурье как для наклона  $k$ , так и для длины выборки  $L$  с использованием логарифмической области. Фундаментальный принцип, лежащий в основе подбора рядов Фурье, заключается в векторном суммировании  $2k$  векторов вращения, исходящих из начальной точки, в результате чего получается траектория, характеризующаяся повышенной стабильностью и точностью.  $L$  и  $k$  подвергаются логарифмической аппроксимации в рамках ряда Фурье первого порядка, как описано в уравнении 3.27.

$$\ln k = A_3(1 - \cos(r \ln L) + B_3 \sin(r \ln L)), \quad (3.27)$$

где  $A_3=2149000$ ,  $B_3=66/38375$ ,  $\tau=9.123 \cdot 10^{-5}$ .

Вычисленное значение соответствия ряда Фурье первого порядка без численной коррекции показало значительное отклонение от истинного значения. Коэффициенты  $m_3$  и  $p_3$  были определены как -15,41 и 45,83 соответственно.

Попытка применить метод Фурье второго порядка привела к тому, что коэффициент корреляции равнялся 1, однако вычисление превысило диапазон вычислений и не привело к сходимости.

Чтобы оценить сильные и слабые стороны трех вариантов корректировки, был проведен сравнительный анализ результатов расчетов для каждого подхода. Вариант 1 включал комбинацию логарифмического первичного полиномиального соответствия в предметной области с мультипликативным степенным соответствием, используя более простую формулу при одновременном повышении коэффициента многократного соответствия. При таком подходе был введен меньший поправочный коэффициент:  $m_1$  был установлен на -1,067, а  $p_1$  - на 5,968, в результате чего средняя частота ошибок составила 0,0642%.

Вариант 2 оказался эффективным инструментом, идеально подходящим как для наклона ( $k$ ), так и для пересечения ( $b$ ).

Поправочный коэффициент, введенный в варианте 3, представляющий собой комбинацию логарифмического ряда Фурье первого порядка и мультипликативной аппроксимации по степени, относительно невелик ( $m_3 = 1,102$ ,  $p_3 = -0,06399$ ). Средняя погрешность минимальна и составляет всего

0,0361%, что свидетельствует о хорошей производительности. Этот подход обеспечивает высокую скорость мультипликативной аппроксимации, несмотря на его более сложную формулу.

Таблица 3.3. Сравнение результатов расчета фрактальной размерности трех предложенных вариантов

| Теоретическое D | Вариант 1      |            | Вариант 2      |            | Вариант 3      |            |
|-----------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|
|                 | Рассчитанное D | Ошибка (%) | Рассчитанное D | Ошибка (%) | Рассчитанное D | Ошибка (%) |
| 2.1             | 2.1034         | 0.1635     | 2.0991         | -0.0447    | 2.0973         | -0.1261    |
| 2.2             | 2.2014         | 0.0619     | 2.1999         | -0.0004    | 2.1976         | -0.1090    |
| 2.3             | 2.3002         | 0.0100     | 2.3007         | 0.0313     | 2.2981         | -0.0786    |
| 2.4             | 2.3995         | -0.0199    | 2.4012         | 0.0508     | 2.3997         | -0.0116    |
| 2.5             | 2.4994         | -0.0230    | 2.5014         | 0.0564     | 2.5028         | 0.1128     |
| 2.6             | 2.5998         | -0.0083    | 2.6013         | 0.0523     | 2.6107         | 0.4138     |
| 2.7             | 2.7006         | 0.0239     | 2.7009         | 0.0366     | 2.7015         | 0.0577     |
| 2.8             | 2.8019         | 0.0669     | 2.8002         | 0.0071     | 2.7971         | -0.1007    |
| 2.9             | 2.9035         | 0.1215     | 2.8991         | -0.0310    | 2.8912         | -0.3020    |

Подводя итог, можно сказать, что вариант 2 демонстрирует удовлетворительную точность расчетов. Скорость аппроксимации и используемые параметры, остаются стабильными независимо от данных. Кроме того, формула, используемая в варианте 2, проще, что делает его предпочтительным выбором для процесса вторичной коррекции.

Теоретически, все три варианта демонстрируют удовлетворительную точность при использовании длины выборки  $L$  ( $L = 0,0001$  м). Учитывая, что числовые поправочные коэффициенты  $m_i$  и  $n_i$  постоянны, вычисленное значение  $D$  сохраняет линейную зависимость от своего теоретического аналога при различных значениях  $L$ , хотя и с некоторыми расхождениями в результатах расчета.

Следовательно, возникает необходимость в применении вторичных поправок к  $m_i$  и  $n_i$ . Для целей вторичной коррекции в варианте 2 рекомендуется не учитывать  $m_2$  и  $n_2$  при использовании формулы первоначальной коррекции в варианте 2 (3.28).

$$R_a = A \left( \frac{2L^{3-D}}{5-D} \right)^B \quad (3.28)$$

Значения  $A$  и  $B$  рассчитываются с использованием приведенных выше уравнений. Начальное значение  $L$  устанавливается равным 0,0001 м с шагом 0,0001 для 10 групп. Начальное значение  $D$  установлено равным 2,05 с шагом 0,05 для 19 групп.

Вычисленное значение фрактальной размерности  $L(D)$  при различных значениях  $L$  сопоставляется с теоретическим значением  $D$  с использованием уравнения 3.29. Это позволяет нам получить подобранные параметры  $k(i)$  и  $b(i)$ , которые получены из мультипликативной степенной аппроксимации второго порядка  $k$  и  $L$ , как показано в уравнении 3.30.

$$L \cdot D = k \cdot D + b, \quad (3.29)$$

$$k = a_k L^{b_k} + c_k \quad (3.30)$$

где  $a_k = 0.03259$ ,  $b_k = -0.25$ ,  $c_k = 0.9185$

Коэффициент корреляции может достигать 1. Аналогично, выполняется подбор с коэффициентом умножения мощности между  $b$  и  $L$ , как показано в уравнении 3.31. Коэффициент подбора в соответствии с  $a_k = -0.07585$ ,  $b_k = -0.2531$ ,  $c_k = 0.373$  также может достигать 0,9999.

$$b = a_b L^{b_b} + c_b \quad (3.31)$$

После выполнения вышеуказанных действий получаем следующую пересмотренную формулу. Упрощенная формула  $R_a$  представлена в уравнении (3.32).

$$R_a = A \left( \frac{2L^{3-(mD+n)}}{5-(mD+n)} \right)^B, \quad (3.32)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $m$ ,  $n$  - поправочные коэффициенты, связанные с длиной выборки  $L$ :

$$A_2 = \exp(-16.99L^{0.003671}),$$

$$B_2 = -10.84L^{0.2317},$$

$$m = 0.03259L^{-0.25} + 0.9185$$

$$n = -0.07585L^{-0.2531}$$

С помощью функции W-M построена фрактальная модель для анизотропных и изотропно изменяющихся поверхностей. Проанализирована взаимосвязь между фрактальной размерностью и традиционными параметрами поверхности. Чтобы устранить ограничения существующих методов вычисления фрактальных размеров, был предложен подход, который вычисляет фрактальную размерность, используя среднюю высоту поверхности,  $R_a$ , в качестве показателя. Это позволяет избежать неустойчивости, вызванной выбором масштаба, которая является распространенной проблемой во многих других методах, и повышает точность вычислений. Относительная погрешность метода составила 0,1460% и 0,0266% при расчете D для анизотропных и изотропно-ориентированных поверхностей соответственно.

### **3.5.2. Построение фрактальной геометрии на основе параметра Хёрста и метода R/S анализа**

Описание и прогноз контактного взаимодействия реальных поверхностей остаются актуальной задачей в трибологии, механике материалов и микроэлектромеханических системах. Традиционные параметры шероховатости не отражают мультишкальную природу микронеровностей. В последние десятилетия широкое распространение получили фрактальные модели, позволяющие описывать статистически самоподобные структуры на различных масштабах. Одной из наиболее распространённых является модель Вейерштрасса–Мандельброта (WM), основанная на суперпозиции гармоник с геометрически возрастающими частотами и случайными фазами. Данная раздел посвящен построению фрактальной модели по измеренной профилограмме, определению её параметров.

Исходная поверхность задаётся профилограммой — последовательностью высот:

$$z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_N),$$

с равномерным шагом дискретизации. Для сравнения с фрактальной моделью рассчитываются следующие параметры:

- Наибольшая высота профиля  $R_z$
- Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$
- Среднее квадратическое отклонение профиля  $R_q$
- Средний шаг неровностей профиля  $S_m$
- Средний шаг местных выступов профиля  $S$
- Средняя квадратическая длина волны профиля,  $\lambda_q$
- Средняя длина волны профиля  $\lambda_a$
- Базовая длина  $L$
- Длина растянутого профиля  $L_o$
- Относительная длина профиля  $l_o$
- Плотность выступов профиля  $D$
- Средний квадратический наклон профиля  $\Delta q$
- Средний арифметический наклон  $\Delta a$
- Опорная длина профиля  $\mu_p$
- Относительная опорная длина профиля  $t_p$
- Относительная опорная кривая профиля

Основное сравнение проводится по параметрам  $R_a$  и  $R_q$  и форме относительной опорной кривой.

**Модель поверхности, основанной на методе Вейерштрасса-Мандельборта** моделируется фракталом методом Вейерштрасса-Мандельборта, основанном на суперпозиции гармоник с разными частотами и фазами.

$$z(x) = L \left( \frac{G}{L} \right)^{(D-1)} \sum_{n=0}^{Nmax} \frac{\cos \left( 2\pi * \gamma^n * \frac{x}{L} + \varphi_0 \right)}{\gamma^{(2-D)*n}} \quad 3.33$$

где  $D$  – фрактальная размерность ряда значений профилограммы, определяется через параметр Херста  $H$ :  $D=2-H$  ( $D=3-H$  для поверхности),  $G$  – масштабный коэффициент, который можно определить через структурную функцию  $S(\tau)$  списка значений:

$$S(\tau) = [z(x + \tau) - z(x)]^2 = G^2 * \tau^{2H} \quad 3.34$$

$L$  – величина обратная физической частоте максимального значения модуля спектра мощности, полученном при дискретном преобразовании Фурье,  $\varphi_0$  – фаза, соответствующая максимальному значению модуля спектра мощности, полученном при дискретном преобразовании Фурье,  $N_{max}$  – соответствует индексу  $k$ , при котором достигается максимальное значение модуля спектра мощности, полученном при дискретном преобразовании Фурье. Для определения параметра Хёрста методом R/S анализа, используется уравнение [3.35]:

$$\frac{R}{S} = (\alpha N)^H \quad 3.35$$

где,  $\alpha$  – постоянная величина (Хёрст предложил 1, но в других работах есть значения 0.5, 0.8, 1.1, 1.3),  $N$  – количество значений профилограммы,  $R$  – размах накопленного отклонения:

$$R = \max_{1 \leq u \leq N}(Z_u) - \min_{1 \leq u \leq N}(Z_u) \quad 3.35$$

Отклонение  $z(x_i)$  от его среднего арифметического значения  $\bar{Z}$ :

$$Z_u = \sum_{i=1}^u (z(x_i) - \bar{Z}) \quad 3.36$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z(x_i) \quad 3.37$$

$S$  – стандартное отклонение ряда значений вычисляется как квадратный корень из дисперсии:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z(x_i) - \bar{Z})^2} \quad 3.38$$

Значение показателя Хёрста можно оценить приближенно по формуле:

$$H = \frac{\log\left(\frac{R}{S}\right)}{\log(\alpha N)} \quad 3.39$$

Значение определяющей частоты и соответствующей ей фазе определяются при помощи дискретного преобразования Фурье для функции  $z=f(x)$ , заданной массивами  $x$  и  $z$  (размерность  $N$ -количество точек в профилограмме, основное условие для следующих ниже формул равномерная сетка по  $x$ ).

### Дискретное преобразование Фурье (ДПФ):

Если  $x$  — равномерная сетка, ДПФ вычисляется только для массива  $z$ .

Формула ДПФ:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} z[n] * e^{-2\pi i * \frac{k*n}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

введем угол:  $\theta = -2\pi * \frac{k*n}{N}$ , тогда:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} z[n] * (\cos(\theta) + i * \sin(\theta))$$

где:  $X[k]$  — комплексный спектр (амплитуда и фаза для частоты  $k$ ),  $z[n]$  — значение функции в точке  $x[n]$ .

Физические частоты  $f_k$  связаны с индексами  $k$ :

$$f_k = \frac{k}{N * \Delta x}, \quad k = 0, 1, \dots, \left[\frac{N}{2}\right]$$

Определяем

$$f_{k_{max}} = \frac{k_{max}}{N * \Delta x}$$

и соответствующую ему

$$L = \frac{1}{f_{k_{max}}}$$

где  $\Delta x$  — шаг между точками  $x$ . Вычисляем амплитудный спектр и получаем зависимость  $|X[k]|$  от  $k$ :

$$|X[k]| = \sqrt{\text{Re}(X[k])^2 + \text{Im}(X[k])^2}$$



определяем максимальное значение амплитуды  $|X|_{max}$  и соответствующее ему  $k_{max}$ , что соответствует  $n_{max}$ . По формуле для фазового спектра:

$$\varphi[k] = \arctan2\left(\frac{Im(X[k])}{Re(X[k])}\right)$$

Определяем  $\varphi_0 = \varphi[k_{max}]$

Для определения масштабного коэффициента  $G$  выполняется построение структурной функции для списка значений профилограммы.

Структурная функция  $S(\tau)$  характеризует среднюю квадратичную разность между значениями списка, разделёнными лагом  $\tau$ .

Шаги алгоритма:

1. Проверка входных данных:

- список содержит не менее двух элементов ( $N \geq 2$ ). Если список пуст или содержит один элемент - ошибка.

2. Определение максимального лага  $\tau_{max}$ :

- по умолчанию  $\tau_{max} = N - 1$ , где  $N$  — длина списка. Для уменьшения шума можно ограничить  $\tau_{max} \leq \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor$

3. Вычисляем  $S(\tau)$  для каждого  $\tau$ :

- для каждого  $\tau$  от 1 до  $\tau_{max}$ :

Находим все пары значений с лагом  $\tau$ :

- пары:  $(z_i, z_{i+\tau})$ , где  $i = 0, 1, \dots, N - 1 - \tau$ .

Вычисляем квадраты разностей для каждой пары:

$$diff^2 = (z_{i+\tau} - z_i)^2$$

Усредняем квадраты разностей:

$$S(\tau) = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=0}^{N-1-\tau} (z_{i+\tau} - z_i)^2$$

4. Возврат результата:

- возвращаем список, где ключ/индекс —  $\tau$ , значение —  $S(\tau)$ .

5. Вычисляем  $G$ :

- выбираем два значения  $\tau$  в диапазоне от 1 до  $k_{max}$  и вычисляем  $G$

$$G = \sqrt{\frac{S(\tau_1) + S(\tau_2)}{\tau_1^{2H} + \tau_2^{2H}}}$$

В качестве примера, на рис.3.39-3.42 приведен пример сравнения заданного измеренного профиля и профиля заданного функцией W-M, а так же соответствующих им опорных кривых.

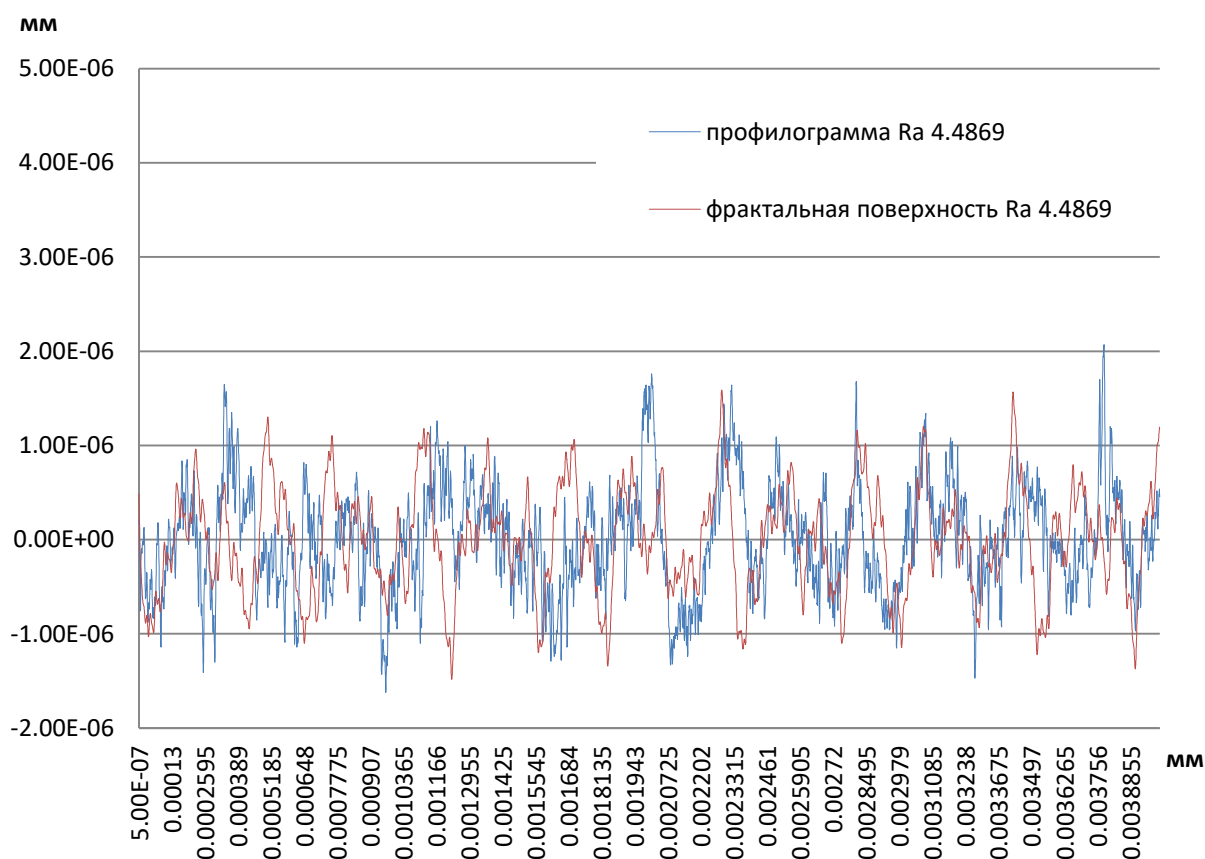


Рис.3.39. Сравнение заданного измеренного профиля (синий) и профиля заданного функцией W-M (красный), материал - Мо

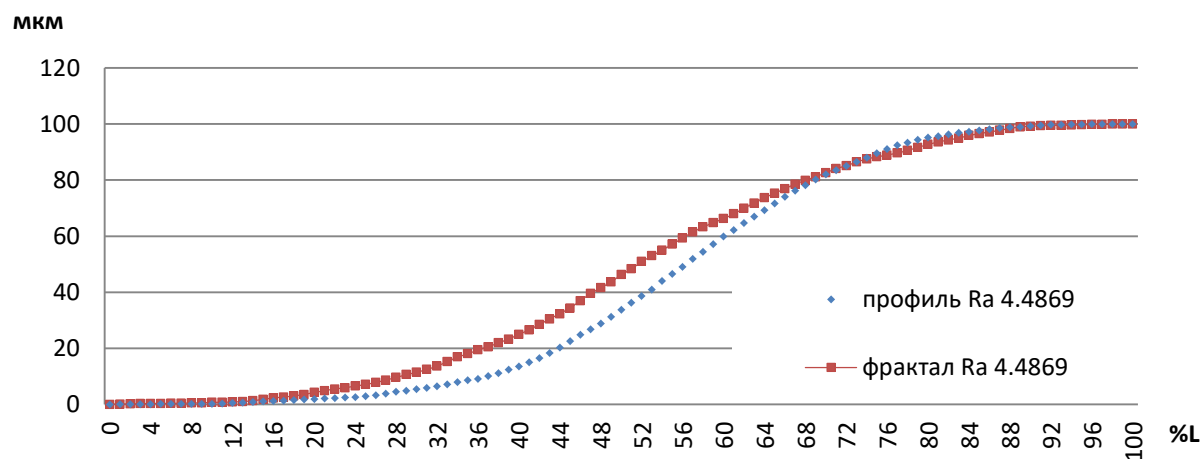


Рис.3.40. Сравнение опорных кривых заданного измеренного профиля (синий) и профиля заданного функцией W-M (красный), материал - Мо

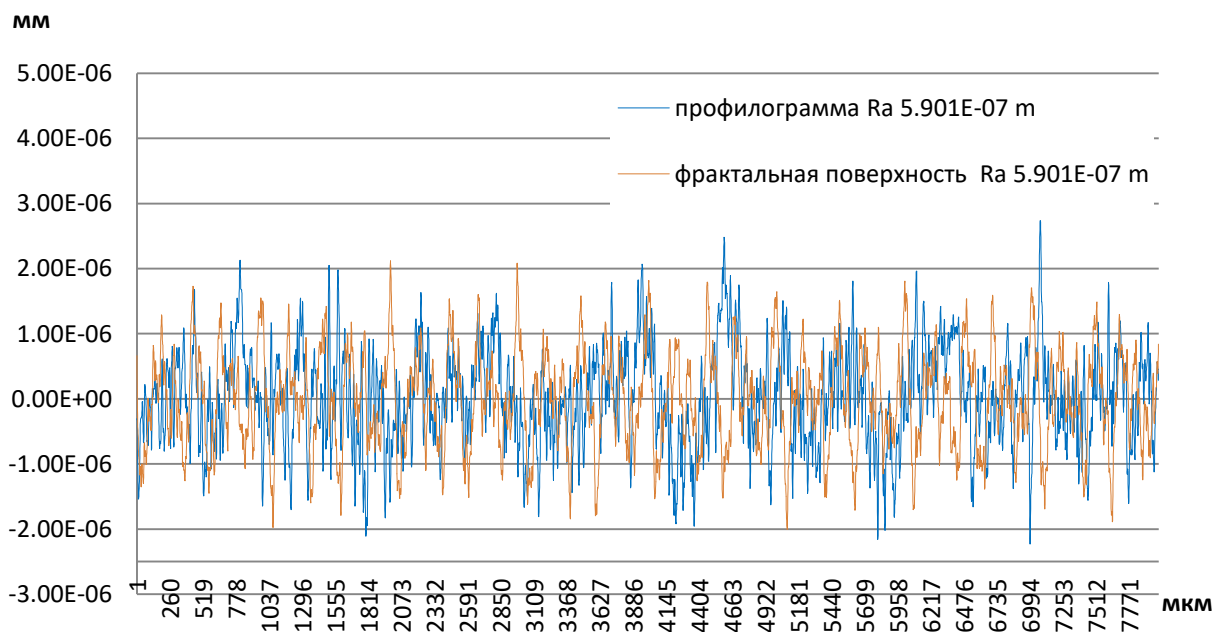


Рис.3.41. Сравнение заданного измеренного профиля (синий) и профиля заданного функцией W-M (красный), материал – 12X10H8T

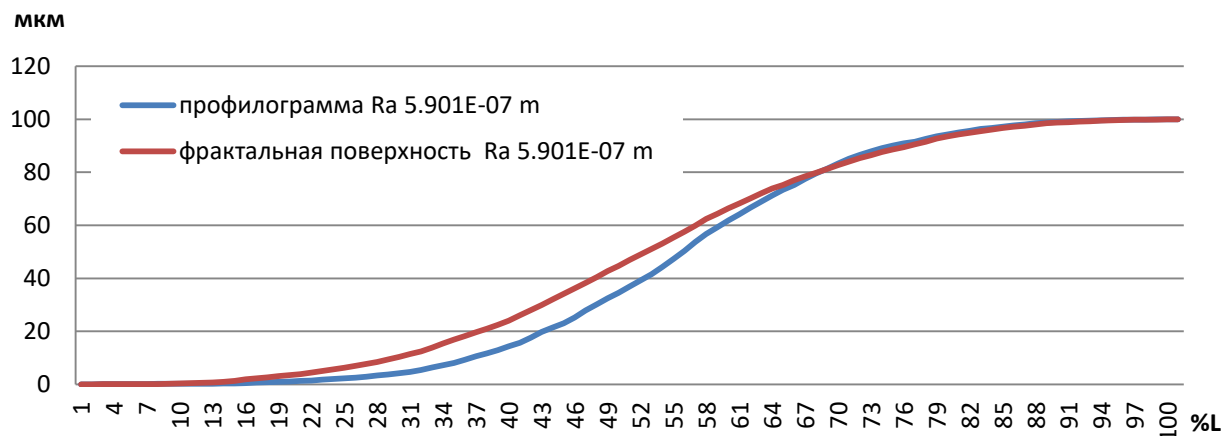


Рис.3.42. Сравнение опорных кривых заданного измеренного профиля (синий) и профиля заданного функцией W-M (красный), материал -12X10H8T

Таблица.3.4 Сравнение заданного измеренного профиля и профиля заданного функцией W-M материал - нержавейка  $Ra= 5.89e-07$  m

| Величина                                  | Из файла<br>профилометра | Расчетное по ГОСТ<br>по данным реальных<br>точек | Расчетное по ГОСТ<br>по данным<br>фрактальных точек |
|-------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Ra                                        | 5.9000E-7                | 5.8954E-7                                        | 5.8984E-7                                           |
| Rq                                        | 7.4400E-7                | 7.4592E-7                                        | 7.2955E-7                                           |
| Rz                                        | 4.2200E-6                | 4.3520E-6                                        | 3.4112E-6                                           |
| Средний шаг<br>неровностей профиля<br>Sm  | -                        | 1.2617E-4                                        | 2.9905E-4                                           |
| Базовая длина I                           | -                        | 3.9995E-3                                        | 3.9995E-3                                           |
| Длина растянутого<br>профиля LO           | -                        | 4.0780E-3                                        | 4.0039E-3                                           |
| относительная длина<br>профиля $l_0=L0/l$ | -                        | 1.0196E+0                                        | 1.0011E+0                                           |

На основании рассчитанных фрактальных параметров D и G, с использованием уравнения 3.000 выполнено построение поверхности (Рис.3.43) заданного функцией W-M:

$$z(x, y) = L \left( \frac{G}{L} \right)^{(D_s-2)} \left( \frac{\ln(\gamma)}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N_{max}} \gamma^{(D_s-3)} \left\{ \cos(\varphi_{m,n}) - \cos \left[ \frac{2\pi\gamma^n(x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}}{L} * \cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} \right) + \varphi_{m,n} \right] \right\}$$

где  $D_s = D + 1$ ,  $M = 10$ ,  $\varphi_{m,n}$  – случайные значения

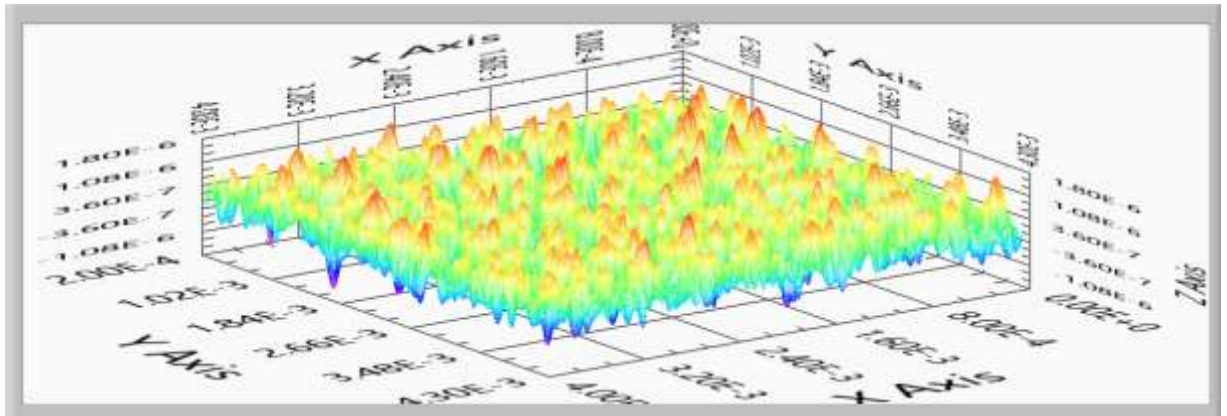


Рис.3.43. Окно из программной реализации поверхности заданной функцией W-M с параметрами  $D=1.3513$   $G=4.0856E-12$   $L=4.44E-3$  ( $R_a=5.89E-07m$ )

Таким образом фрактальный подход на основе модели Вейерштрасса–Мандельброта позволяет эффективно воспроизводить статистические характеристики реальных шероховатых поверхностей. Сравнение с исходной профилограммой целесообразно проводить по параметрам  $R_a$ ,  $R_q$  и относительной опорной кривой.

### Выводы по Главе 3

Глава посвящена разработке геометрической модели микрорельефа контактирующих поверхностей, что является ключевым этапом при решении задачи контактного теплообмена. Установлено, что традиционные подходы к моделированию шероховатости — будь то статистические модели или упрощённые геометрические аппроксимации в виде сфер или конусов — не обеспечивают достаточной точности при воспроизведении реальной площади контакта и, как следствие, не позволяют достоверно оценить контактное термическое сопротивление. Особое внимание уделено критическому анализу методов измерения микротопографии. Показано, что контактные методы (например, профилография с алмазной иглой) в ряде случаев, особенно для мягких или хрупких материалов, вносят искажения в исходные данные, тогда как бесконтактные методы — в частности, лазерная конфокальная микроскопия — обеспечивают более репрезентативную и объёмную информацию о поверхности, необходимую для построения адекватной расчётной модели.

На основе полученных профилограмм разработан оригинальный алгоритм формирования макета цифрового двойника шероховатой поверхности. Предложены два метода обработки исходных данных: метод вершин и метод локальных экстремумов. Оба подхода позволяют существенно снизить вычислительную сложность задачи за счёт фильтрации избыточной информации при сохранении ключевых характеристик микрорельефа — распределения высот, среднего шага неровностей и топологической структуры, определяющей фактическую площадь контакта. Программная реализация алгоритма на языке Fortran обеспечивает автоматизированное построение трёхмерного облака точек с последующим восстановлением гладкой поверхности методом сплайновой интерполяции. Полученная модель пригодна для последующего конечно-элементного анализа механического взаимодействия и теплопередачи в зоне контакта.

Параллельно проведена адаптация фрактального подхода к описанию микрогеометрии. На основе функции Вейерштрасса–Мандельброта построены как

изотропные, так и анизотропные модели шероховатых поверхностей. Впервые предложен метод определения фрактальной размерности  $D$  напрямую по параметру  $R_a$ , что позволяет избежать сложных и нестабильных процедур прямого расчёта  $D$  по данным топографии. Достигнута высокая точность (ошибка менее 0,15%) при восстановлении фрактальных характеристик по известным параметрам шероховатости. Дополнительно реализован метод R/S-анализа для определения параметра Хёрста, что дало возможность построить фрактальную модель, согласованную с исходной профилограммой не только по  $R_a$  и  $R_q$ , но и по форме опорной кривой — ключевому индикатору несущей способности поверхности.

В совокупности, представленные в главе методы формируют основу для создания достоверного цифрового двойника контактной пары, учитывающего как статистические, так и фрактальные особенности микрорельефа. Это позволяет существенно повысить достоверность расчётов контактного термического сопротивления за счёт более точного определения геометрии взаимодействующих поверхностей и, как следствие, реальной площади теплопроводящего контакта.

## ГЛАВА 4. МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОРЕЛЬЕФОВ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ.

### 4.1. Модель контактного взаимодействия на базе фрактальной теории

#### 4.1.1 Модель эквивалентной микрогеометрии

Взаимодействие двух шероховатых поверхностей с фрактальными параметрами

Поверхность 1:  $D_1, G_1$

Поверхность 2:  $D_2, G_2$

заменяется эквивалентной задачей контакта гладкой плоскости и одной эквивалентной шероховатой поверхности с параметрами  $D_{\text{экв}}$ ,  $G_{\text{экв}}$ , как показано на рисунке ниже.

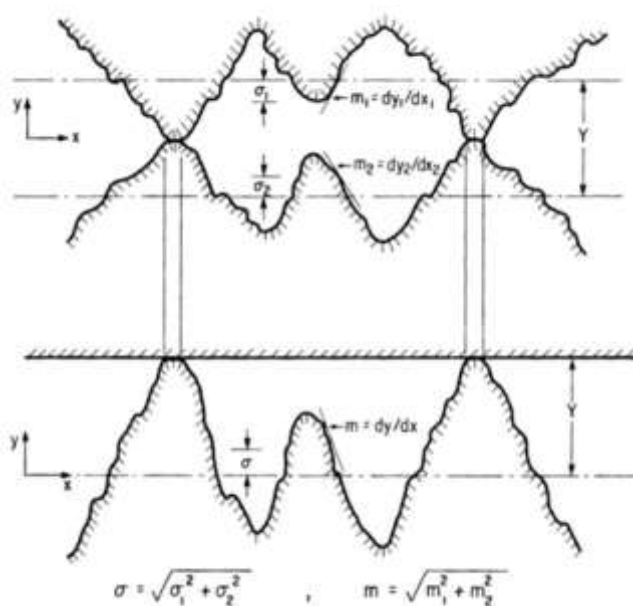


Рис.4.1. Замена контакта двух поверхностей на контакт эквивалентной поверхности и плоскости

Существует два основных подхода к построению эквивалентной поверхности:

1. Аддитивное объединение (высоты складываются) применяется, когда поверхности статистически независимы и взаимодействуют «точка к точке». В этом случае эквивалентный параметр шероховатости вычисляется по формуле квадратичного сложения:



$$G_{\text{экв}} = \sqrt{G_1^2 + G_2^2}$$

Эквивалентная фрактальная размерность определяется как взвешенное среднее:

$$D_{\text{экв}} = \frac{G_1^2 * D_1 + G_2^2 * D_2}{G_1^2 + G_2^2}$$

Веса  $G_1^2$  и  $G_2^2$  отражают вклад каждой поверхности в общую шероховатость: чем больше амплитуда неровностей, тем сильнее её влияние на результирующую структуру.

**2. Пространственное объединение** (поверхности занимают разные области) используется, если поверхности контактируют не по всей площади одновременно, а по отдельным участкам. Тогда параметры усредняются по площади контакта  $A_1$  и  $A_2$  :

$$D_{\text{экв}} = \frac{A_1 * D_1 + A_2 * D_2}{A_1 + A_2}$$

$$G_{\text{экв}} = \frac{A_1 * G_1 + A_2 * G_2}{A_1 + A_2}$$

Наиболее корректный способ построения эквивалентной поверхности — через структурную функцию (Structure Function, SF), которая количественно описывает изменчивость высоты поверхности с расстоянием. Для фрактальной поверхности структурная функция имеет вид:

$$S(\tau) = [z(x + \tau) - z(x)]^2 = G^2 * \tau^{2H}$$

где:

$z(x)$  — высота поверхности в точке  $x$ ,

$\tau$  — расстояние между точками (лаг),

$H$  — показатель Хёрста ( $H=3-D$ ),

$G$  — параметр шероховатости,

$D$  — фрактальная размерность.

Алгоритм определения эквивалентных параметров через структурные функции представляет собой следующую последовательность:

### **1. Расчёт структурных функций для исходных поверхностей**

Для каждой поверхности ( $i=1,2$ ) вычисляем структурную функцию  $S_i(\tau)$  по формуле:

$$S_i(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [z_i(x_k + \tau) - z_i(x_k)]^2$$

где  $N$  — количество точек.

Аппроксимируем  $S_i(\tau)$  степенным законом:

$$S_i(\tau) = G_i^2 * \tau^{2H_i}$$

и определяем  $H_i$  (наклон в логарифмических координатах:

$$\ln S_i(\tau) \sim 2H_i \ln \tau \text{ и } G_i.$$

## 2. Комбинирование структурных функций

В зависимости от типа объединения:

аддитивное объединение (высоты складываются):

$$S_{\text{эКВ}}(\tau) = S_1(\tau) + S_2(\tau);$$

пространственное объединение (поверхности занимают разные области):

$$S_{\text{эКВ}}(\tau) = \frac{A_1 * S_1(\tau) + A_2 * S_2(\tau)}{A_1 + A_2}$$

## 3. Аппроксимация эквивалентной структурной функции

Для  $S_{\text{эКВ}}(\tau)$ :

- Строится график  $\ln S_{\text{эКВ}}(\tau)$  от  $\ln \tau$ .
- Методом линейной регрессии определяется:

- Наклон прямой:  $2H_{\text{эКВ}}$ ,

- Отрезок на оси ординат:  $\ln G_{\text{эКВ}}^2$

- Вычисляются итоговые параметры:

$$H_{\text{эКВ}} = \frac{\text{наклон}}{2} \quad G_{\text{эКВ}} = \sqrt{e^{(\text{отрезок})}} \quad D_{\text{эКВ}} = 3 - H_{\text{эКВ}}.$$

Этот подход учитывает реальную статистику поверхностей и считается наиболее точным.

#### 4.1.2. Анализ взаимодействия двух шероховатых поверхностей на основании схемы взаимодействия плоскости и эквивалентной поверхности

Цель анализа -получить функциональные зависимости:

- Реальной площади контакта  $A_r$  от величины сближения  $\delta$
- Контактного давления  $p$  от  $\delta$

Данный анализ проведен в разработанном программном комплексе, алгоритм которого, представлен в виде следующей последовательности:

1. На основе ранее определенных  $D_{экв}$ ,  $G_{экв}$  и характерного масштаба генерируется облако точек эквивалентной поверхности.
2. Поверхность последовательно «срезается» горизонтальной плоскостью на уровнях  $z=-\delta$ , где  $\delta$  — величина сближения.
3. Точки, лежащие ниже уровня среза, объединяются в связные области (пятна контакта)  $a_n$  по критерию расстояния между соседними точками. (Рис.4.2)

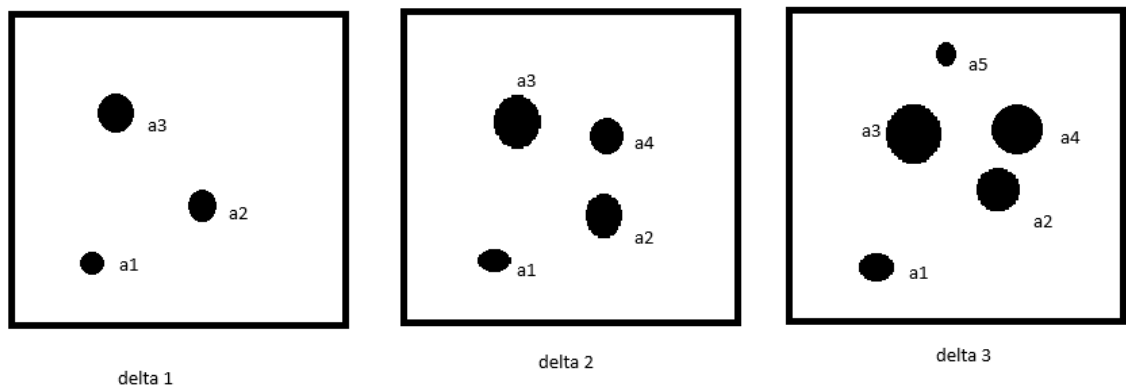


Рис.4.2. Формирование пятен контакта плоскости и эквивалентной поверхности

Далее, происходит классификация пятен контакта по режиму деформации. Критическая площадь, при которой упругие деформации переходят в пластические описывается выражением:

$$a_c = G^2 \left[ \frac{2^{(9-2D)}}{9\pi^{(3-D)}} * \left( \frac{E^*}{H} \right)^2 \ln \gamma \right]^{\frac{1}{(D-1)}} \text{ или}$$

$$a_c = \frac{G^2}{\left( \frac{\pi H}{2K_m E^*} \right)^{\left( \frac{2}{(D-1)} \right)}}$$

Если  $a_n \leq a_c$ , то это пластические деформации и распределение нагрузки  $F_{an}$  по всей поверхности контакта может быть выражено как:

$$F_{an} = F_p = H * a_n \quad \text{площадь } S(\delta_m) = \sum_1^{N_{\delta_m}} a_n^{\delta_m}$$

Если  $a_n > a_c$ , то это упругие деформации и распределение нагрузки  $F_{an}$  по всей поверхности контакта может быть выражено как:

$$F_{an} = F_e = \frac{2^{(11-2D)/2}}{3\pi^{(4-D)/2}} (\ln \gamma)^{\frac{1}{2}} G^{(D-2)} E^* \left( \frac{a_n}{2} \right)^{(4-D)/2}$$

$$\text{сила } F(\delta_m) = \sum_1^{N_{\delta_m}} F_{an}^{\delta_m}$$

где: H-твердость по Викерсу,  $K_m$  — коэффициент  $K_m = \frac{H}{\sigma}$ ,  $\sigma$ -предел прочности на сжатие,  $E^*$ -приведенный модуль упругости

В качестве примера, рассмотрим расчет зависимости изменения площади контакта и межконтактного давления от величины сближения плоской и эквивалентной поверхностей. Характеристики материалов и поверхностей образцов одинаковые, среднеарифметическое отклонение профиля:  $R_a = 0.589$  мкм, материал – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

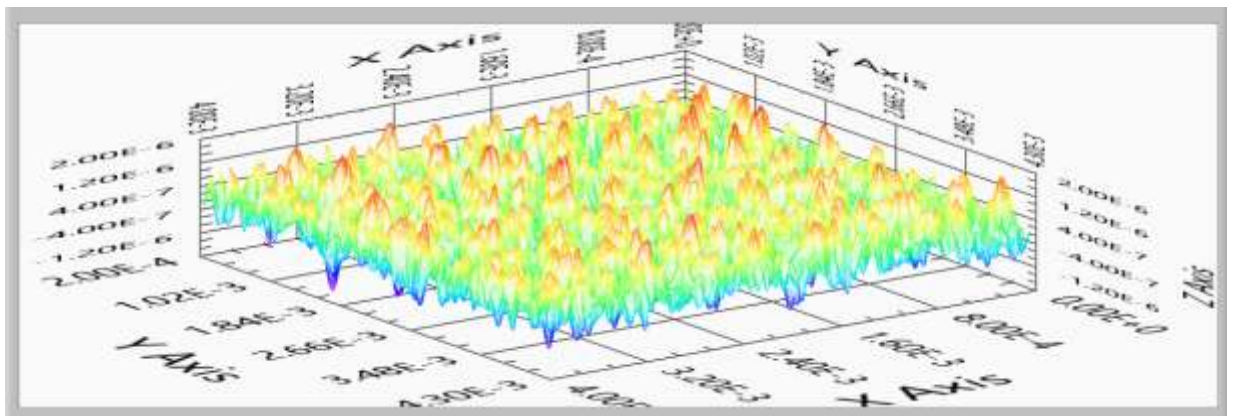


Рис.4.3. Окно из программной реализации эквивалентной поверхности заданной функцией W-М с параметрами  $D=1.3513$   $G=4.0856E-12$   $L=4.44E-3$  ( $R_a = 5.89E-07$ м)

По результатам вычислений по описанной ранее математической модели в разработанном ПО получены зависимости изменения площади контакта и давления от величины сближения образцов (Табл.4.1).

Таблица 4.1. Изменение площади контакта и давления  
от величины сближения образцов

| Сближение, мкм                           | 0      | 0.396  | 0.793 | 1.19   | 1.98   | 2.38   | 2.77   | 3.17   | 3.57   |
|------------------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Давление от пластических деформаций, МПа | 0.002  | 0.008  | 0.016 | 0.026  | 0.115  | 0.518  | 1.074  | 2.251  | 4.075  |
| Давление от упругих деформаций, МПа      | 0,0    | 0,0    | 0,0   | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    |
| % Площади фактического контакта          | 0.0001 | 0.0005 | 0.001 | 0.0016 | 0.0072 | 0.0324 | 0.0671 | 0.1407 | 0.2547 |
| Фрактальная размерность, D               |        |        |       |        |        |        |        |        |        |

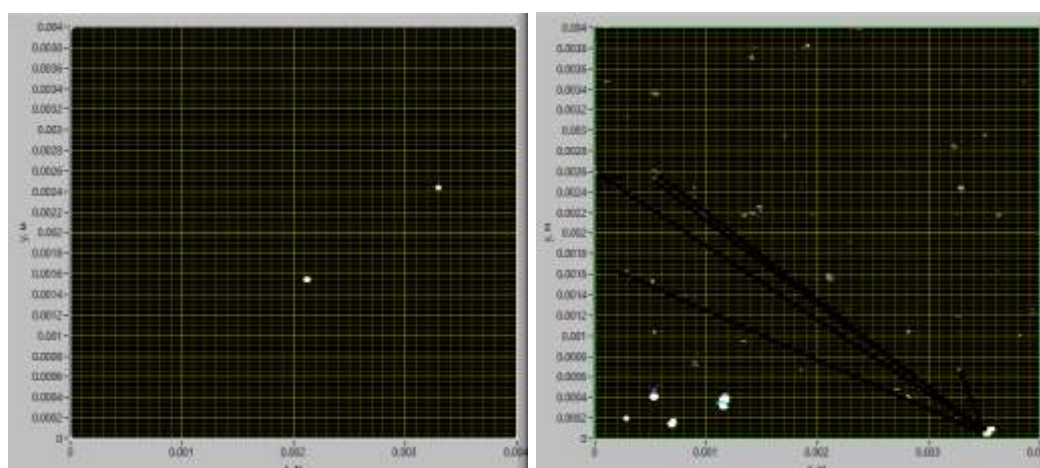


Рис.4.4. Программная реализация расчета площадей фактического контакта на базе фрактального метода

Анализируя результаты расчётов, можно сделать вывод, что при всех рассмотренных значениях сближения все пятна контакта находились в режиме пластической деформации. Это означает, что упругая компонента давления была пренебрежимо мала по сравнению с пластической. Также отмечено, что результаты сильно зависят от конкретной реализации (генерации) поверхности, так как фрактальные поверхности стохастичны. В некоторых расчётах учитывалось изменение параметров  $D$  и  $G$  в зависимости от сближения (поскольку при увеличении  $\delta$  в контакт вступают всё более крупные площади контакта). Однако в ряде случаев даже без этого учёта результаты оказывались близкими, что говорит о возможной устойчивости модели к таким уточнениям.

Разработанный алгоритм и программное обеспечение на его основе позволяют определять не только изменения площади контакта и величины сближения от межконтактного давления, но и рассчитывать межконтактный объем и коэффициент трения между поверхностями при заданной силе сжатия.

#### **4.2. Численное моделирование контактного взаимодействия на базе макета цифрового двойника микрорельефа поверхностей методом конечно-элементного анализа.**

При использовании метода конечных элементов необходимо точно знать, какие параметры сеточной модели должны быть установлены, чтобы добиться максимально достоверного результата. Поэтому на начальном этапе производилась оценка влияния базовой длины и качества сеточной модели на величину сближения образцов, формирование площади контакта и КТС.

Поскольку суть методики конечных элементов заключается в описании произвольного объема простыми геометрическими фигурами, в данном случае тетраэдрами, то от того насколько правильно подобран параметр описания криволинейных поверхностей данными элементами зависит конечный результат. В качестве параметра, отвечающего за описание кривизны поверхности, принят угол кривизны к нормали поверхности (Рис.4.5)

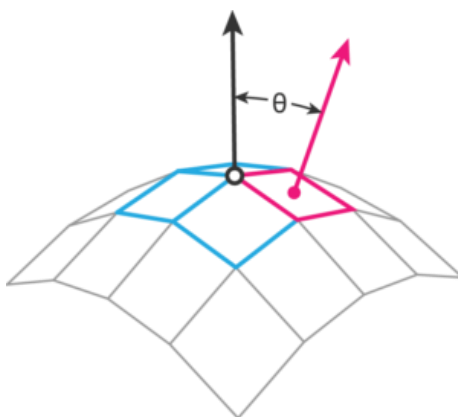


Рис.4.5. Угол кривизны к нормали поверхности.

Еще одним влияющим фактором является базовая длина смоделированной поверхности на формирование площади контакта и КТС. Суть метода конечных элементов (МКЭ) применительно к шероховатости поверхности сводится к построению расчетной сеточной модели (Рис.4.6.) на основе 3-х мерной твердотельной модели шероховатости поверхности, полученной в результате расчета по предложенному выше алгоритму.

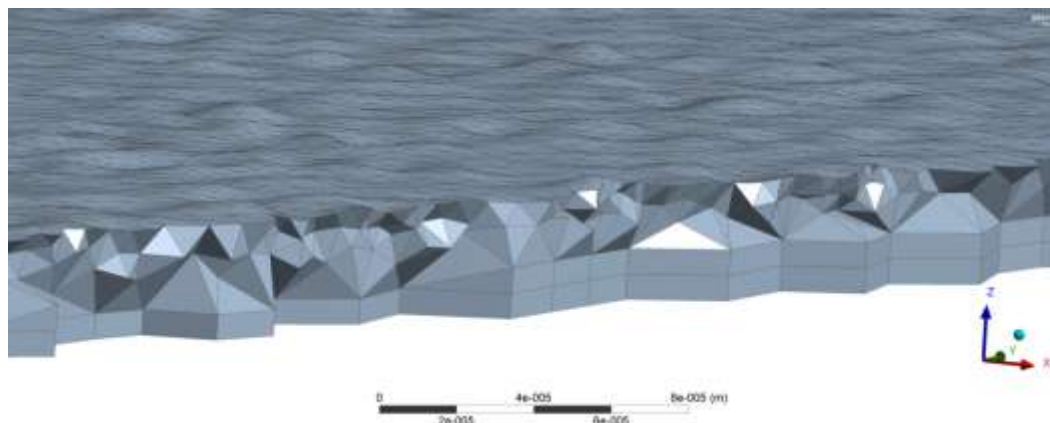


Рис.4.6. - Сеточная модель шероховатости поверхности.

Исходным объектом для применения МКЭ является материальное тело (в общем случае – область, занимаемая сплошной средой или полем), которое разбивается на части – конечные элементы (КЭ) (Рис.4.7.). В результате такого разбиения создается сетка из границ элементов. Точки пересечения этих границ образуют узлы. На границах и внутри элементов могут быть созданы дополнительные узловые точки. Совокупность всех конечных элементов и узлов является основой конечно-элементной модели деформируемого твердого тела. Дискретная модель должна максимально полно покрывать область исследуемого объекта.

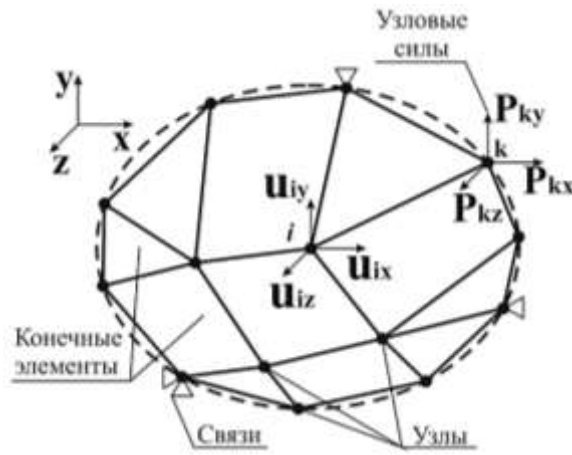


Рис.4.7. - Разбивка тела на конечные элементы.

Поставленная задача рассматривалась как задача линейно-упругого деформирования твёрдого тела при малых деформациях и малых перемещениях [150]. Принято условие, что конечные элементы взаимодействуют только через общие узлы. Внутренние распределённые силы, действующие по границам произвольного элемента  $e$ , заменяются статически эквивалентными узловыми силами, составляющими вектор узловых сил элемента  $\{F\}_e$ . Внешние распределённые массовые и поверхностные силы, действующие на конечный элемент, приводятся к статически или энергетически эквивалентным узловым силам, образующим соответственно векторы  $\{P\}_e^g$  и  $\{P\}_e^q$ . К эквивалентным узловым силам приводятся также силы инерции (как массовые силы), начальные деформации, в том числе температурные (вектор  $\{P\}_e^{\varepsilon_0}$ ), начальные напряжения (вектор  $\{P\}_e^{\sigma_0}$ ).

При этом матричное уравнение жёсткости элемента имеет вид:

$$[K]_e \{U\}_e = \{F\}_e + \{P\}_e^g + \{P\}_e^q + \{P\}_e^{\varepsilon_0} + \{P\}_e^{\sigma_0}, \quad (4.1)$$

где  $[K]_e$  - матрица жесткости элемента, состоящая из коэффициентов жесткости, а  $\{U\}_e$  - вектор узловых перемещений элемента.

Обоснование уравнения (3.1) может быть выполнено с помощью теории упругости или сопротивления материалов, но такой подход имеет ряд недостатков [362]. Более эффективными и во многих случаях более корректными способами обоснования уравнений жёсткости элементов являются вариационные методы и методы невязок [363,364].



Вариационные методы позволяют получать общую систему уравнений равновесия всей модели без введения узловых сил, то есть без предположения о взаимодействии элементов только через узлы и без составления соотношений (3.1) для жёсткости элементов. Однако в вычислительном процессе метода конечных элементов удобнее вначале определять матрицы элементов  $[K]_e, \{P\}_e^g, \{P\}_e^q, \{P\}_e^{\varepsilon_0}, \{P\}_e^{\sigma_0}$ , а затем из них собирать общие матрицы системы уравнений равновесия модели по стандартным правилам суммирования компонентов матриц с одинаковыми индексами.

Если рассматривается динамическая задача деформирования, то на основании принципа Даламбера в уравнение (3.1) добавляются узловые силы, эквивалентные массовым силам инерции, зависящим от ускорения. Демпфирование учитывается эквивалентными объёмными силами вязкого сопротивления, пропорциональными скорости деформации. В результате получается дифференциальное матричное уравнение

$$[m]_e \frac{d^2}{dt^2} \{U\}_e + [C]_e \frac{d}{dt} \{U\}_e + [K]_e \{U\}_e = \{F\}_e, \quad (3.2)$$

где  $[C]_e$  - матрица демпфирования элемента, зависящая от коэффициента вязкого демпфирования  $\mu$ ,

$[m]_e$  - матрица массы элемента, зависящая от плотности материала элемента  $\rho$ .

Обоснование МКЭ для тепловых задач обычно проводится или путём минимизации соответствующего функционала или способом Галёркина. Для конечного элемента в случае стационарной теплопроводности получается соотношение, подобное (3.1):

$$[K]_e \{T\}_e = \{Q\}_e + \{Q\}_e^g + \{Q\}_e^q + \{Q\}_e^h, \quad (3.3)$$

где  $[K]_e$  - матрица теплопроводности элемента;

$\{T\}_e$  - вектор узловых температур элемента;

$\{Q\}_e$  - условные узловые тепловые нагрузки элемента от других элементов;

$\{Q\}_e^g, \{Q\}_e^q, \{Q\}_e^h$  - векторы узловых тепловых нагрузок элемента, эквивалентные

соответственно поверхностному тепловому потоку, тепловым потокам от внутренних источников тепла и от конвективного теплообмена.

С учетом того, что характер распределения температур в рассматриваемой конструкции меняется во времени, решается задача нестационарной теплопроводности, а для этого в рассматриваемое уравнение необходимо добавить слагаемое, учитывающее накопление тепла в материале. В результате получается дифференциальное матричное уравнение:

$$[C]_e \frac{d}{dt} \{T\}_e + [K]_e \{T\}_e = \{Q\}_e + \{Q\}_e^g + \{Q\}_e^q + \{Q\}_e^h, \quad (3.4)$$

где  $[C]_e$  - матрица теплоемкости элемента.

Программной средой, позволяющей проводить детальный анализ теплового и напряженно-деформированного состояния конструкции, является ANSYS Multiphysics [362]. Выбор данной программной среды обусловлен возможностью использовать при выполнении сопряженного анализа тепловой и прочностной задачи единственную конечно-элементную модель, с соответствующим набором параметров.

В качестве граничных условий для выполнения прочностного анализа установлено следующее: (Рис. 4.8):

- 1) Нагрузка на образцы 2,5 МПа (нагрузка *A*)
- 2) Материал образцов – 12X18H10T
- 3) Шероховатость образцов 0,531 мкм и 0,647 мкм
- 4) К боковым границам образцов приложены граничные условия скользящей заделки без трения (нагрузка *C, D*)
- 5) К нижней границе приложены граничные условия жесткой заделки (нагрузка *B*)

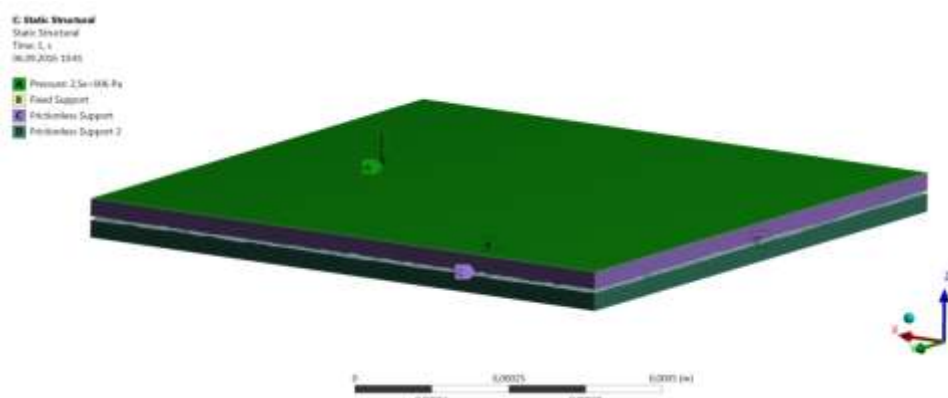


Рис. 4.8. Задание граничных условий для решения задачи механического взаимодействия

- 6) Контакт происходит с трением,  $k=0,3$  [69]
- 7) Угол  $\Theta$ , в качестве примера, варьируется в диапазоне от  $20^\circ$  до  $50^\circ$  с шагом  $5^\circ$
- 8) Исследуются три образца с  $L=1\text{ мм}$ ,  $2\text{ мм}$ ,  $3\text{ мм}$

Для каждого из образцов получено по 7 расчетов КТС. Вид сеточной модели для каждого из углов  $\Theta$  представлены на рисунках 4.9-4.15.

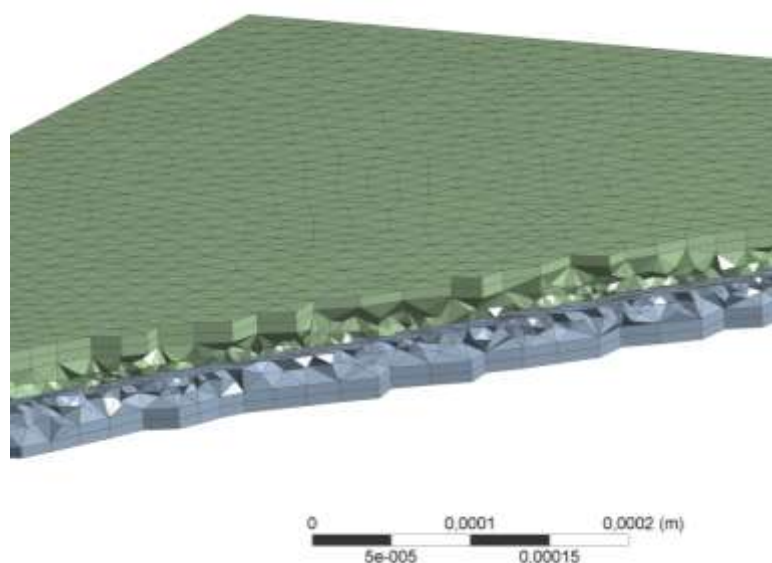


Рис.4.9.- Сеточная модель для  $\Theta = 20^\circ$

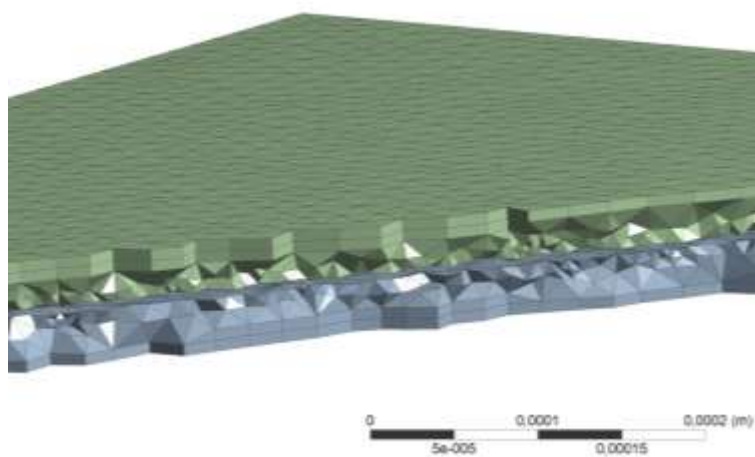


Рис. 4.10.- Сеточная модель для  $\Theta = 25^\circ$

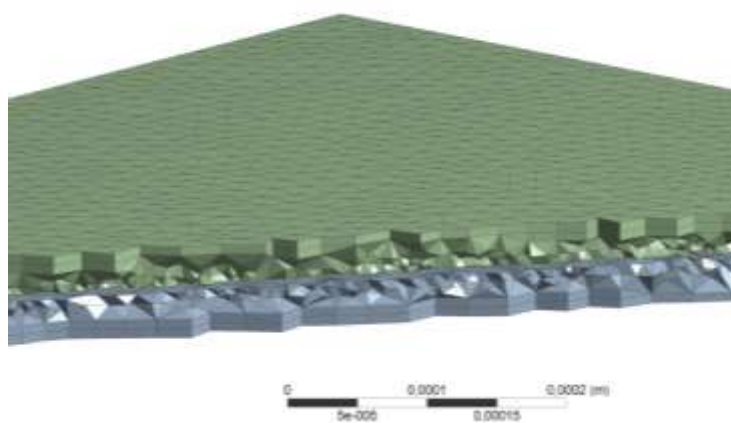


Рис. 4.11.- Сеточная модель для  $\Theta = 30^\circ$

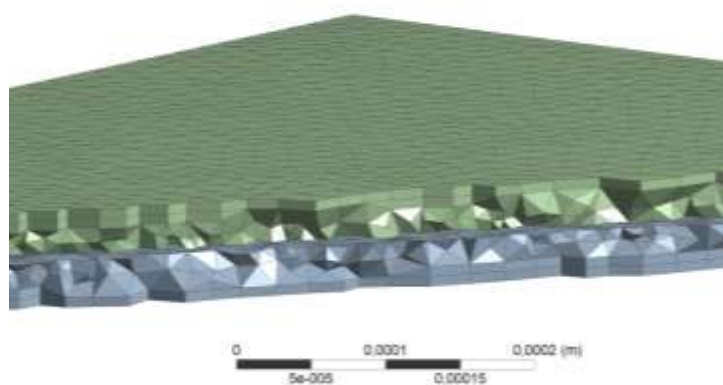


Рис. 4.12.- Сеточная модель для  $\Theta = 35^\circ$

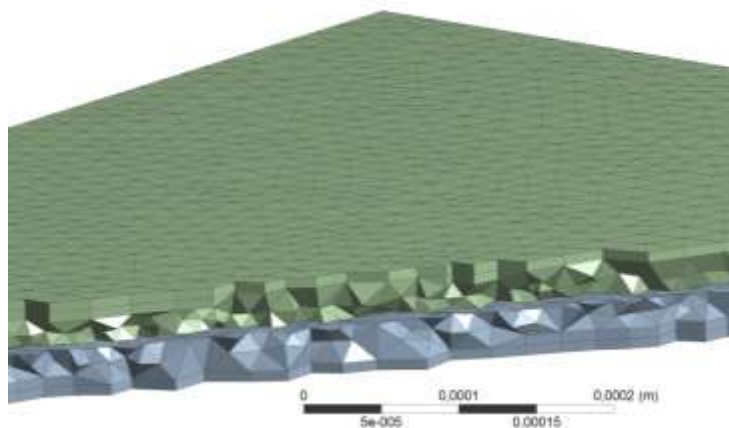


Рис. 4.13.- Сеточная модель для  $\Theta = 40^\circ$

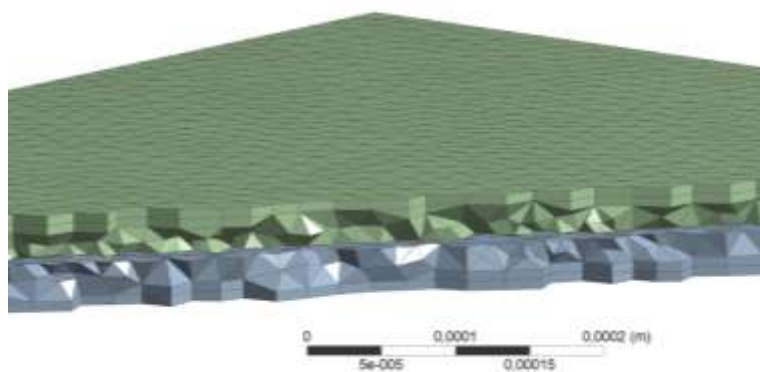


Рис. 4.14.- Сеточная модель для  $\Theta = 45^\circ$

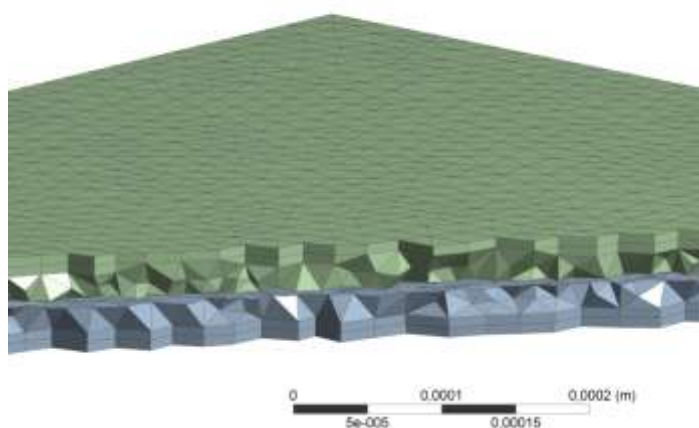


Рис. 4.15.- Сеточная модель для  $\Theta = 50^\circ$

После передачи сеточной модели в подпрограмму прочностного анализа, к ней были приложены соответствующие граничные условия (Рис.4.8) По результатам прочностного анализа получены значения эквивалентных

напряжений (Рис.4.16) и межконтактного давления, величина сближения поверхностей.

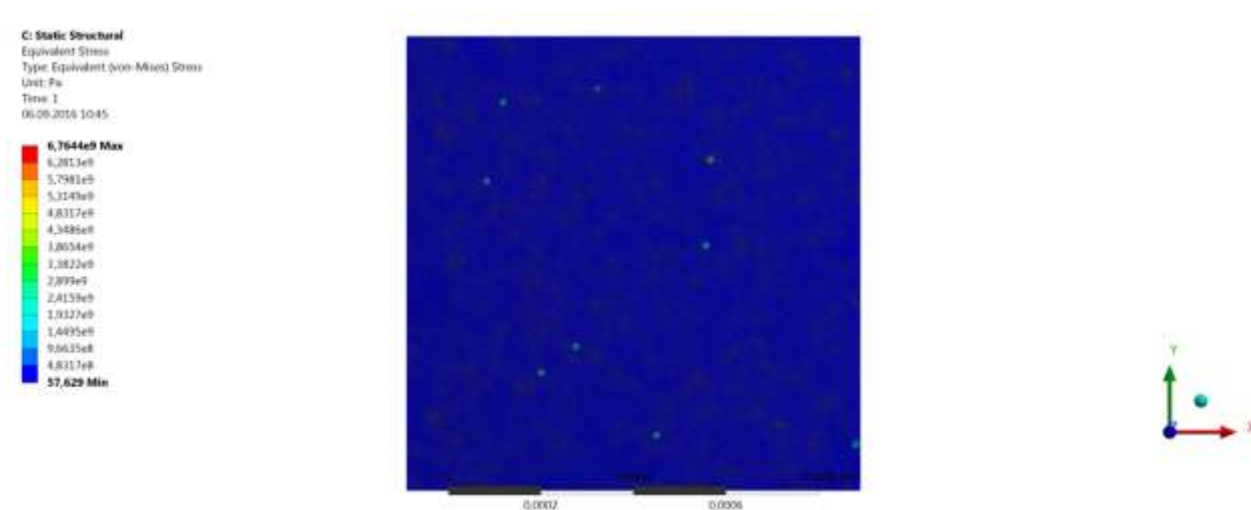


Рис. 4.16. Поле эквивалентных напряжений на поверхности 12X18N10Т для приложенного давления  $2,5 \cdot 10^6$  Па.

Формирование фактической площади контакта происходит по алгоритму, описанному ниже. За основу берется твердотельная модель контакта шероховатых поверхностей, полученная из прочностного расчета. Используя величину смещения одной поверхности относительно другой, верхний образец перемещается на заданное расстояние (Рис.4.17).

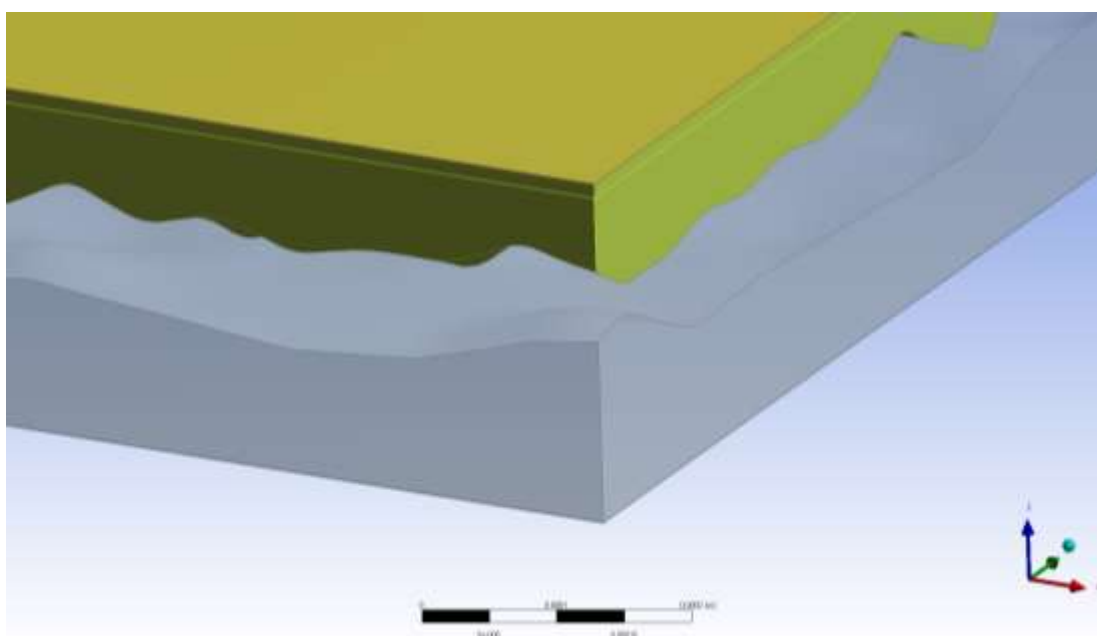


Рис. 4.17.— Перемещение поверхности на величину смещения.

После перемещения поверхности, получаем эффект смятия одного твердого тела другим. Для того, чтобы в областях пластической деформации были образованы поверхности контакта необходимо удалить пересекающиеся объемы. В результате выполнения данной операции получается модель фактической площади контакта двух шероховатых поверхностей (Рис.4.18)

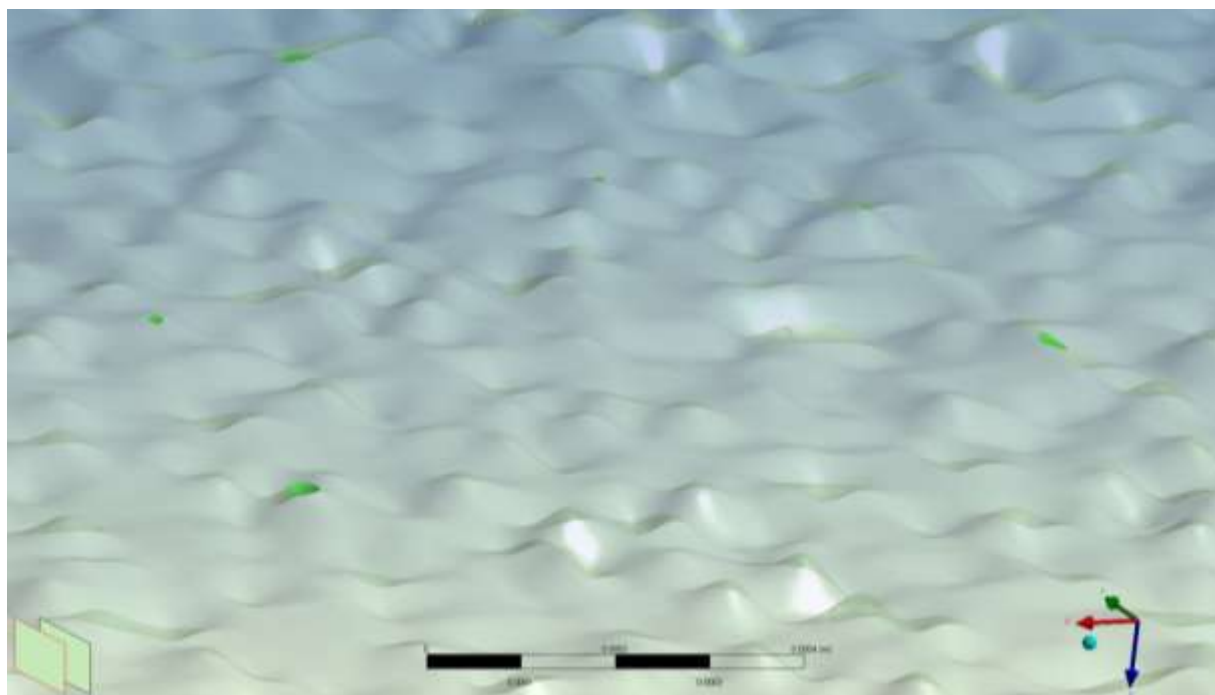


Рис. 4.18. Фактическая площадь касания поверхностей (отмечена зеленым).

Подобный расчет выполнен для каждого угла  $\Theta$ . Результаты расчетов фактической площади контакта двух поверхностей, количество элементов и узлов сеточной модели приведены в таблице 4.2.

Таблица.4.2 Зависимость фактической площади контакта двух поверхностей, количество элементов и узлов сеточной модели от угла  $\Theta$ .

а)  $L=1\text{мм}$

| Угол $\Theta$ | Кол-во Узлов | Количество Элементов | Смещение              | Фактическая площадь  | % от всей площади |
|---------------|--------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| град, °       | шт           | шт                   | м                     | м <sup>2</sup>       | %                 |
| 20            | 707196       | 436123               | $1,043 \cdot 10^{-6}$ | $4,0 \cdot 10^{-10}$ | 0,042             |
| 25            | 493926       | 297932               | $1,091 \cdot 10^{-6}$ | $4,6 \cdot 10^{-10}$ | 0,048             |
| 30            | 372588       | 219030               | $1,064 \cdot 10^{-6}$ | $4,8 \cdot 10^{-10}$ | 0,050             |
| 35            | 294592       | 169313               | $1,043 \cdot 10^{-6}$ | $4,0 \cdot 10^{-10}$ | 0,042             |
| 40            | 242899       | 136475               | $1,108 \cdot 10^{-6}$ | $5,1 \cdot 10^{-10}$ | 0,054             |

|    |        |        |                       |                      |       |
|----|--------|--------|-----------------------|----------------------|-------|
| 45 | 707196 | 436123 | $1,042 \cdot 10^{-6}$ | $4,0 \cdot 10^{-10}$ | 0,042 |
|----|--------|--------|-----------------------|----------------------|-------|

б)  $L=2\text{мм}$

| Угол $\Theta$ | Кол-во Узлов | Количество Элементов | Смещение              | Фактическая площадь | % от всей площади |
|---------------|--------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| град, °       | шт           | шт                   | м                     | м <sup>2</sup>      | %                 |
| 20            | 895516       | 537582               | $1,399 \cdot 10^{-6}$ | $2,4 \cdot 10^{-9}$ | 0,065             |
| 25            | 634354       | 372768               | $1,374 \cdot 10^{-6}$ | $2,2 \cdot 10^{-9}$ | 0,060             |
| 30            | 475829       | 273576               | $1,307 \cdot 10^{-6}$ | $1,8 \cdot 10^{-9}$ | 0,050             |
| 35            | 371275       | 208908               | $1,272 \cdot 10^{-6}$ | $1,6 \cdot 10^{-9}$ | 0,044             |
| 40            | 294803       | 163569               | $1,302 \cdot 10^{-6}$ | $1,7 \cdot 10^{-9}$ | 0,046             |
| 45            | 239864       | 130379               | $1,272 \cdot 10^{-6}$ | $1,6 \cdot 10^{-9}$ | 0,044             |

в)  $L=3\text{мм}$

| Угол $\Theta$ | Кол-во Узлов | Количество Элементов | Смещение              | Фактическая площадь | % от всей площади |
|---------------|--------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| град, °       | шт           | шт                   | м                     | м <sup>2</sup>      | %                 |
| 20            | 984754       | 548283               | $1,124 \cdot 10^{-6}$ | $3,9 \cdot 10^{-9}$ | 0,045             |
| 25            | 730625       | 394137               | $1,187 \cdot 10^{-6}$ | $3,8 \cdot 10^{-9}$ | 0,044             |
| 30            | 553202       | 286554               | $1,086 \cdot 10^{-6}$ | $3,4 \cdot 10^{-9}$ | 0,039             |
| 35            | 423049       | 208276               | $1,125 \cdot 10^{-6}$ | $3,7 \cdot 10^{-9}$ | 0,043             |
| 40            | 332402       | 155330               | $1,064 \cdot 10^{-6}$ | $3,1 \cdot 10^{-9}$ | 0,037             |
| 45            | 278068       | 125973               | $1,106 \cdot 10^{-6}$ | $3,7 \cdot 10^{-9}$ | 0,043             |

Как видно из таблицы 4.2 уменьшение угла  $\Theta$  не всегда ведет к уменьшению площади контакта поверхностей, но всегда ведет к увеличению количества элементов сеточной модели, что в свою очередь сказывается на продолжительности расчета и повышенными требованиями к производительности вычислительного оборудования. Средний процент от всей площади контактирующих поверхности для образца с базовой длиной

для  $L=1\text{мм}$  равен 0,046%,

для  $L=2\text{ мм}$  – 0,051% ,

для  $L=3\text{ мм}$  – 0,042%.



#### Выводы по Главе 4

В четвертой главе диссертации выполнен комплексный анализ контактного взаимодействия шероховатых поверхностей как с позиций механики деформируемого твердого тела, так и особенностей численного моделирования. Выполненные исследования позволяют выполнять оценки контактного термического сопротивления и точности расчётов теплообмена в сопряжениях твердых тел.

Разработана и обоснована модель эквивалентной микрогеометрии, позволяющая заменить контакт двух фрактальных поверхностей на взаимодействие гладкой плоскости с одной эквивалентной шероховатой. Применение структурной функции для определения эквивалентных фрактальных параметров обеспечивает высокую физическую достоверность модели, учитывающую статистические особенности микрорельефа. Это позволяет корректно оценивать реальную площадь контакта и, соответственно, теплопроводность на границе раздела. На основе построенной эквивалентной модели реализован алгоритм численного определения зависимости реальной площади контакта и контактного давления от величины сближения поверхностей. Анализ показал, что в условиях, соответствующих экспериментальным данным по шероховатости ( $R_a \approx 0.5\text{--}0.6$  мкм) и материалу 12X18H10T, при приложенных давлениях до 2.5 МПа контакт осуществляется преимущественно в зоне пластических деформаций. Вклад упругой составляющей в формирование площади контакта пренебрежимо мал, что существенно упрощает моделирование теплообмена в таких контактах, так как геометрия пятен контакта стабилизирована и определяется, в основном, твердостью материала.

Параллельно проведено конечно-элементное моделирование взаимодействия шероховатых поверхностей в среде ANSYS Multiphysics с учётом трения и заданных граничных условий. Показано, что формирование фактической площади контакта зависит от параметров микрогеометрии и сеточной дискретизации. Оценка влияния угла разбиения поверхности и базовой длины модели ( $L = 1\text{--}3$  мм) выявила нелинейный характер зависимости площади

контакта от угла кривизны при дискретизации. При этом средняя доля реальной площади контакта составила от 0.042% до 0.051% от номинальной площади, что согласуется с общепринятыми представлениями о микроконтактировании и подтверждает корректность подхода к оценке контактной теплопроводности.

Результаты исследования, представленные в этой главе обеспечивают основу для последующего расчёта термических сопротивлений и подтверждают необходимость учёта именно пластического характера микроконтактов при моделировании теплопередачи в технических соединениях. Разработанные модели и программные инструменты позволяют генерировать входные данные для нейросетевых и аналитических моделей расчёта контактной теплопроводности с заданной достоверностью.

## ГЛАВА 5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ.

### 5.1. Общая схема протекания тепловых процессов в соединениях

В однородных средах с установившимся температурным полем линия теплового потока образует собой кривую, проходящую как перпендикуляр к изотермическим поверхностям внутри тела. Таким образом, вектор градиента температур будет всегда ориентирован по касательной к линиям теплового потока. С наличием теплового контакта в твёрдых телах происходит искривление изотермических поверхностей, что приводит к поэтапному стягиванию линий теплового потока к зонам фактического соединения тел. Стягивание происходит с начала к макропятнам, образованным волнистостью поверхности, а потом внутри макропятен к микропятнам контакта, обусловленным шероховатостью (Рис.5.1).

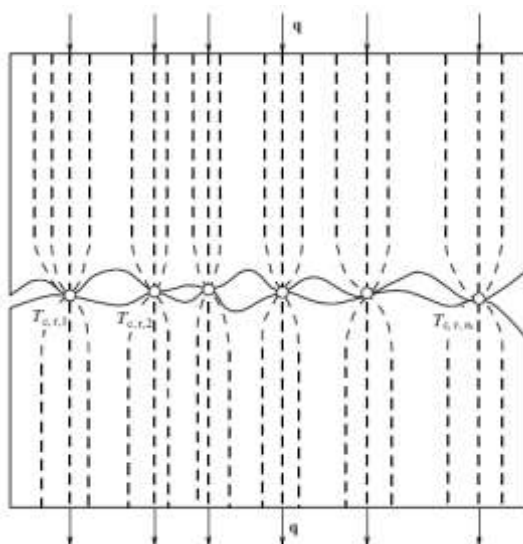


Рис.5.1. - Стягивание линий теплового потока к зонам фактического контакта

Макро пятна, в действительности, представляют собой области сгущения микропятен, где наблюдается локальное механическое взаимодействие поверхностей. Микростягивание линий теплового потока к области фактического контакта имеет место в непосредственной близости от средней плоскости контакта на расстоянии порядка

$$\delta_{cn} \sim \left( \frac{A_n}{n_r} \right)^{1/2}, \quad (5.1)$$

где  $A_n$  — номинальная площадь контакта,  $\text{м}^2$ ;

$n_r$  — число пятен фактического контакта.

Слой материала, ограниченный с одной стороны средней плоскостью контакта, а с другой — плоскостью, отстоящей от неё на расстояние  $\delta_{cp}$  называется зоной возмущения. В пределах этой зоны микростягивание имеет время релаксации – время выхода на стационарный режим равное:

$$\tau_1 = \frac{\Delta^2}{a_1} = \frac{A_a}{n_r a_1} \text{ для тела 1} \quad (5.2)$$

$$\tau_2 = \frac{\Delta^2}{a_2} = \frac{A_a}{n_r a_2} \text{ для тела 2} \quad (5.3)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$  — температуропроводности материалов 1 и 2,  $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$ .

В переходных тепловых режимах, характерное время которых  $\tau_c$  превышает время релаксации, считается, что в каждый момент нестационарные процессы описываются классической теорией теплопроводности.

Контактное термическое сопротивление (в общем виде) находится из выражения (5.4):

$$R_k = \frac{\Delta T_k}{q_{cp}} \quad (5.4)$$

Входящий в (5.4) средний тепловой поток определяется из одномерного уравнения Фурье по известной теплопроводности материалов стержней и градиентам температур. Температурный перепад в зоне контакта  $T_k$  вычисляется по данным термодатчиков по длине стержней с использованием метода линейной экстраполяции.

КТС зависит от шероховатости поверхностей, давления, прижимающего две поверхности одна к другой, и свойств среды в зазорах с учетом температуры в зоне контакта. Механизм передачи теплоты в зоне контакта довольно сложен. В местах непосредственного контакта твердых поверхностей теплота переносится путем теплопроводности, а в зазорах, заполненных газом или жидкостью, - путем конвекции и излучения, т.е. полная термическая проводимость контакта может быть представлена в виде суммы трех составляющих, а именно термическая

проводимость мест фактического контакта  $1/R_m$ , термическая проводимость среды в контакте  $1/R_c$  и проводимости за счет излучения  $1/R_l$ . [322]

$$\frac{1}{R_K} = \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_L} \quad (5.5)$$

В многих исследованиях показано, что доля теплового излучения в полной термической проводимости составляет 2-3%. Поэтому в первом приближении величиной  $1/R_l$  можно пренебречь. Однако в некоторых ситуациях (для материалов с низким коэффициентом теплопроводности, контактирующих в вакууме при низких контактных давлениях) влияние теплового излучения может вносить существенный вклад в теплообмен. Когда расстояние между двумя поверхностями сравнимо с характерной длиной волны, определенной законом смещения Вина, или меньше этой величины, суммарный тепловой поток излучения может увеличиваться из-за затухающего волнового взаимодействия между двумя поверхностями. Это явление называется тепловым излучением в ближней зоне. Тепловое излучение в ближней зоне описывается уравнением Максвелла и может быть решено с помощью метода флуктуационной электродинамики. В частности, с помощью теоремы о флуктуационной диссипации можно найти усредненный по времени вектор Пойнтинга для случайных уравнений Максвелла [365,366]. Для двух полубесконечных пластин, находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга, тепловой поток, который учитывает излучение как в дальнем (5.6), так и в ближнем поле (5.7), описываются уравнениями:

$$q_{fr} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty d\omega [\Theta(\omega, T_1) - \Theta(\omega, T_2)] \int_0^{k_0} \left( \frac{(1 - |r_{01}^s|^2)(1 - |r_{02}^s|^2)}{|1 - r_{01}^s r_{02}^s e^{2iRe(k_\perp)d}|^2} + \frac{(1 - |r_{01}^p|^2)(1 - |r_{02}^p|^2)}{|1 - r_{01}^p r_{02}^p e^{2iRe(k_\perp)d}|^2} \right) k_p dk_p \quad (5.6)$$

$$q_{fr} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty d\omega [\Theta(\omega, T_1) - \Theta(\omega, T_2)] \int_0^{k_0} \left( \frac{(1 - |r_{01}^s|^2)(1 - |r_{02}^s|^2)}{|1 - r_{01}^s r_{02}^s e^{2iRe(k_\perp)d}|^2} + \frac{(1 - |r_{01}^p|^2)(1 - |r_{02}^p|^2)}{|1 - r_{01}^p r_{02}^p e^{2iRe(k_\perp)d}|^2} \right) k_p dk_p \quad (5.7)$$

где  $k_0^2 = k_p^2 + k_\perp^2$ ,  $k_0$  - волновой вектор в вакууме,

$k_\parallel$  и  $k_\perp$  - волновой вектор, параллельный границе раздела и перпендикулярный границе раздела соответственно,

$r_{01}^s r_{02}^s$  - коэффициенты отражения Френеля,

$\Theta(\omega, T)$  - это средняя энергия осциллятора Планка, находящегося в тепловом равновесии при температуре  $T$ , и может быть выражена уравнением

$$\Theta(\omega, T) = \frac{h\omega}{\exp(h\omega/k_B T) - 1} \quad (5.8)$$

где  $h$  - постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ ;

$k_B$  - постоянная Больцмана;

$\omega$  - угловая частота.

Следовательно, проводимости за счет излучения может быть выражена уравнением:

$$1/R_{\Pi} = \frac{q_{nr} + q_{fr}}{\Delta T} \quad (5.9)$$

В большинстве случаев проводимость за счет излучения, обусловленная тепловым излучением в дальнем поле, также может быть рассчитана с помощью уравнения:

$$1/R_{\Pi fr} = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^b \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \quad (5.10)$$

где  $\epsilon_1, \epsilon_2$  – степень черноты поверхностей;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ ;

$b$  - это константа, связанная с формой контакта,

$b = 0$  для контакта с плоской пластиной,

$b = 1$  для цилиндрических поверхностей,

$b = 2$  для сферических форм;

$T_1, T_2$  – температуры поверхностей контакта, К.

## 5.2. Модель контактного теплообмена на базе фрактальной теории

Как указано в базовой теории термического сопротивления существует три формы теплопередачи между двумя шероховатыми поверхностями. Теплопроводность среды между границей раздела и тепловое излучение границы

обычно игнорируются. Термическое контактное сопротивление  $r_c$ , формируемое одноточечным микроконтактом, может быть выражено как:

$$r_c = \frac{1}{2c\lambda_s} \phi(c/b) \quad (5.11)$$

В приведенной выше формуле,  $\lambda_s$  представляет собой эквивалентную теплопроводность, которая конкретно выражается как:

$$\frac{2}{\lambda_s} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \quad (5.12)$$

где  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  соответственно представлены теплопроводности самого материала. В формуле (5.11),  $b$  является радиусом области контакта,  $c$  - является радиусом канала теплового потока,  $b$  и  $c$  может быть рассчитано по следующей формуле:

$$c/b = (A_r^*)^{1/2} \quad (5.13)$$

$A_r^*$  представляет собой безразмерную фактическую площадь контакта, выраженную как

$$A_r^* = A_r / A_a \quad (5.14)$$

где,  $A_r$  - номинальная площадь контакта,

$A_a = L^2$  – это квадрат длины выборки.

В формуле (5.11)  $\phi$ - скорость сближения поверхностей, которая может быть приблизительно выражена как:

$$\phi(c/b) = (1 - c/b)^{1.5} \quad (5.15)$$

Если радиус пятна контакта  $r$  используется для выражения  $c$ , то формула (5.11) может быть выражена как :

$$r_c = \frac{(1 - (A_r^*)^{1/2})^{1.5}}{2\lambda_s r} \quad (5.16)$$

Тогда контактная термическая проводимость  $h_c$  при одноточечном контакте может быть выражена как:

$$h_c = \frac{1}{r_c} = \frac{2\lambda_s r}{(1 - (A_r^*)^{1/2})^{1.5}} \quad (5.17)$$

Теплопроводность фактических площадок для одноточечного контакта при упругой, упругопластической и пластической деформации равная  $h_{ce}$ ,  $h_{cep}$ ,  $h_{cp}$  выражается как:

$$h_{ce} = 2\lambda_s a^{1/2} / (\sqrt{2\pi} [1 - (A_r^*)^{1/2}]^{3/2}) \quad (5.18)$$

$$h_{cep} = (2\lambda_s [a(1 + f(a))^{1/2}] / (\sqrt{2\pi} [1 - (A_r^*)^{1/2}]^{3/2}) \quad (5.19)$$

$$h_{cp} = 2\lambda_s a^{1/2} / (\sqrt{2\pi} [1 - (A_r^*)^{1/2}]^{3/2}) \quad (5.20)$$

Суммарная контактная термическая проводимость  $H_c$  фактических площадок контактной поверхности может быть выражена как:

$$H_c = \int_0^{a_{c2}} h_{cp} n(a) da + \int_{a_{c2}}^{a_{c1}} h_{cep} n(a) da + \int_{a_{c1}}^{a_L} h_{ce} n(a) da \quad (5.21)$$

Тогда, общая контактная термическая проводимость  $H_c$  между контактными поверхностями может быть выражена как :

$$H_c = \frac{a_L^{D/2}}{\sqrt{\pi} [1 - (A_r^{1/2})]^{3/2}} \left[ \frac{\sqrt{2D}\lambda_s}{2-D} a_{c2}^{(1-D)/2} + D\lambda_s \int_{a_{c2}}^{a_{c1}} \frac{(1 + f(a))^{1/2}}{a^{(D+1)/2}} da + \frac{2D \cdot \lambda_s}{2-D} (a_L^{(1-D)/2} - a_{c1}^{(1-D)/2}) \right] \quad (5.22)$$

Таким образом, для получения общего контактного теплового сопротивления поверхности контакта  $R_c$  можно использовать следующую формулу

$$R_c = \frac{1}{H_c} \quad (5.23)$$



### 5.3. Численное моделирование теплового взаимодействия на базе макета цифрового двойника микрорельефа поверхностей методом конечно-элементного анализа

Знание фактических площадей касания позволяет максимально близко приблизиться к определению достоверного значения КТС. Для получения распределения температурного поля в контактной паре в подпрограмму теплового анализа передается измененная под действием сжимающих нагрузок модель микрогеометрии шероховатой поверхности.

Располагая картиной формирования площади контакта, можно задаться температурой верхнего образца  $T_{верх}$ , и тепловым потоком, отводимым от нижнего образца.

Производя расчёт сначала для модели с шероховатой поверхностью, а затем для модели идеального контакта, состоящей из прямых соосных цилиндров, контактирующих по плоской торцевой поверхности, можно получить температуры на границах рассматриваемых элементов. При этом величина контактного термического сопротивления определяется из формулы:

$$R_K = (T_{ниж1} - T_{ниж2})/q, \quad (5.24)$$

где  $T_{ниж1}$  и  $T_{ниж2}$  – температуры холодных поверхностей идеального и реального контактов соответственно, полученные 2-х шаговым решением,  $q$  – средняя величина плотности теплового потока прошедшего через зону контакта.

Для контроля распределения температурного поля в зависимости от приложенного теплового потока параметры решателя были установлены на разбиение одного шага расчета на 10 подшагов. В результате проведения теплового расчета формируется поле температур, направление и величина теплового потока в контактирующих образцах. На рисунках 4.13 – 4.15 представлено распределение температурного поля контактирующих поверхностей.

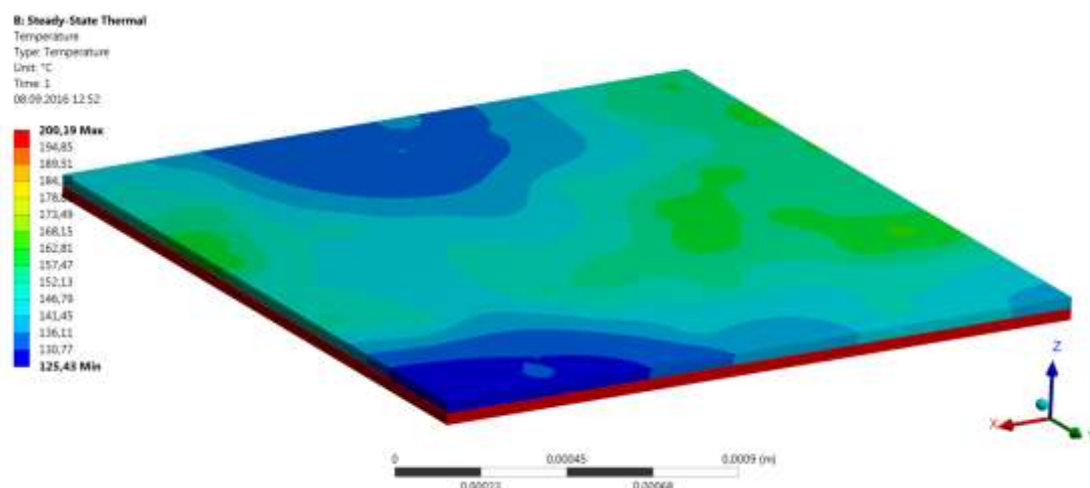


Рис. 5.2. Распределение температурного поля в контактной паре 12X10H8T – 12X10H8T при межконтактном давлении  $25 \cdot 10^5$  Па.

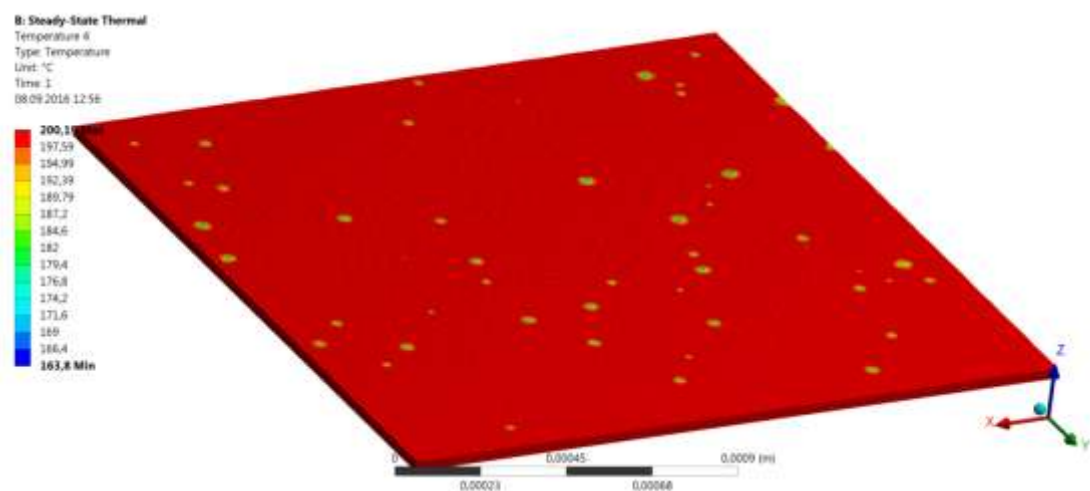


Рис. 5.3. Распределение температурного поля на поверхности верхнего образца 12X10H8T при межконтактном давлении  $25 \cdot 10^5$  Па..

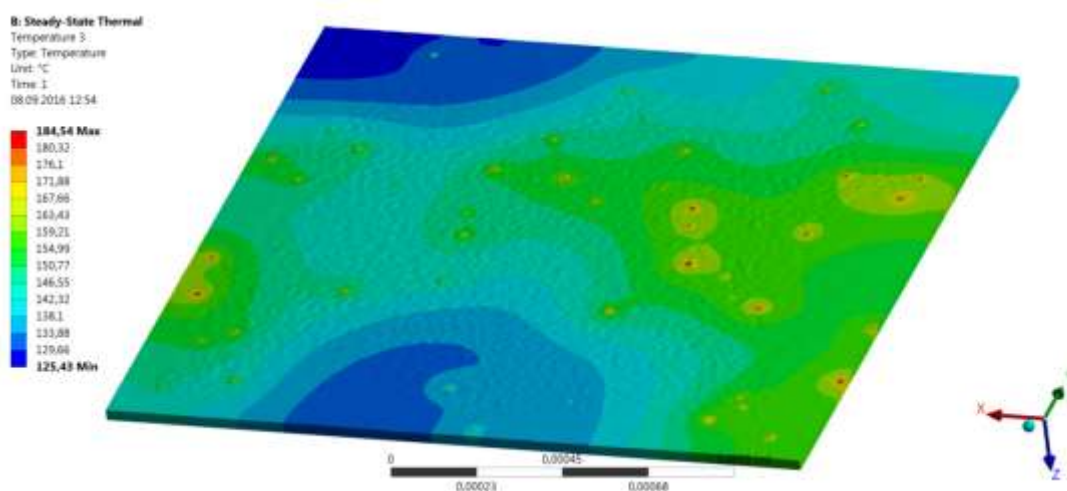


Рис. 5.4. Распределение температурного поля на поверхности нижнего образца 12X10H8T при межконтактном давлении  $25 \cdot 10^5$  Па..

Полученные значения температур в контактирующих поверхностях могут быть использованы для расчета КТС между соответствующими парами материалов. Результаты расчетов температурного поля контактирующих образцов в зависимости от угла  $\Theta$  сведены в таблицу 5.1.:

Табл.5.1.  
Зависимость температуры в контакте от угла  $\Theta$

а)  $L=1\text{мм}$

| Угол $\Theta$ | $T_{\text{мин}}$ | $T_{\text{макс}}$ | $R_K \cdot 10^4$     |
|---------------|------------------|-------------------|----------------------|
| град, °       | °C               |                   | К·м <sup>2</sup> /Вт |
| 20            | 90,60            | 200,00            | 10,94                |
| 25            | 107,17           | 200,00            | 9,28                 |
| 30            | 112,04           | 200,00            | 8,79                 |
| 35            | 90,72            | 200,00            | 10,93                |
| 40            | 115,39           | 200,00            | 8,46                 |
| 45            | 90,60            | 200,00            | 10,93                |

б)  $L=2\text{мм}$

| Угол $\Theta$ | $T_{\text{мин}}$ | $T_{\text{макс}}$ | $R_K \cdot 10^4$     |
|---------------|------------------|-------------------|----------------------|
| град, °       | °C               |                   | К·м <sup>2</sup> /Вт |
| 20            | 125,43           | 200,00            | 7,46                 |
| 25            | 120,03           | 200,00            | 8,00                 |
| 30            | 96,87            | 200,00            | 10,31                |
| 35            | 100,01           | 200,00            | 10,00                |
| 40            | 93,00            | 200,00            | 10,70                |
| 45            | 99,83            | 200,00            | 10,02                |

в)  $L=3\text{мм}$

| Угол $\Theta$ | $T_{\text{мин}}$ | $T_{\text{макс}}$ | $R_K \cdot 10^4$     |
|---------------|------------------|-------------------|----------------------|
| град, °       | °C               |                   | К·м <sup>2</sup> /Вт |
| 20            | 109,62           | 200,00            | 9,04                 |
| 25            | 114,62           | 200,00            | 8,54                 |
| 30            | 103,79           | 200,00            | 9,62                 |
| 35            | 109,15           | 200,00            | 9,08                 |
| 40            | 97,92            | 200,00            | 10,21                |
| 45            | 109,74           | 200,00            | 9,03                 |

Для сравнения были использованы аналитические зависимости авторов [88,116,324]:

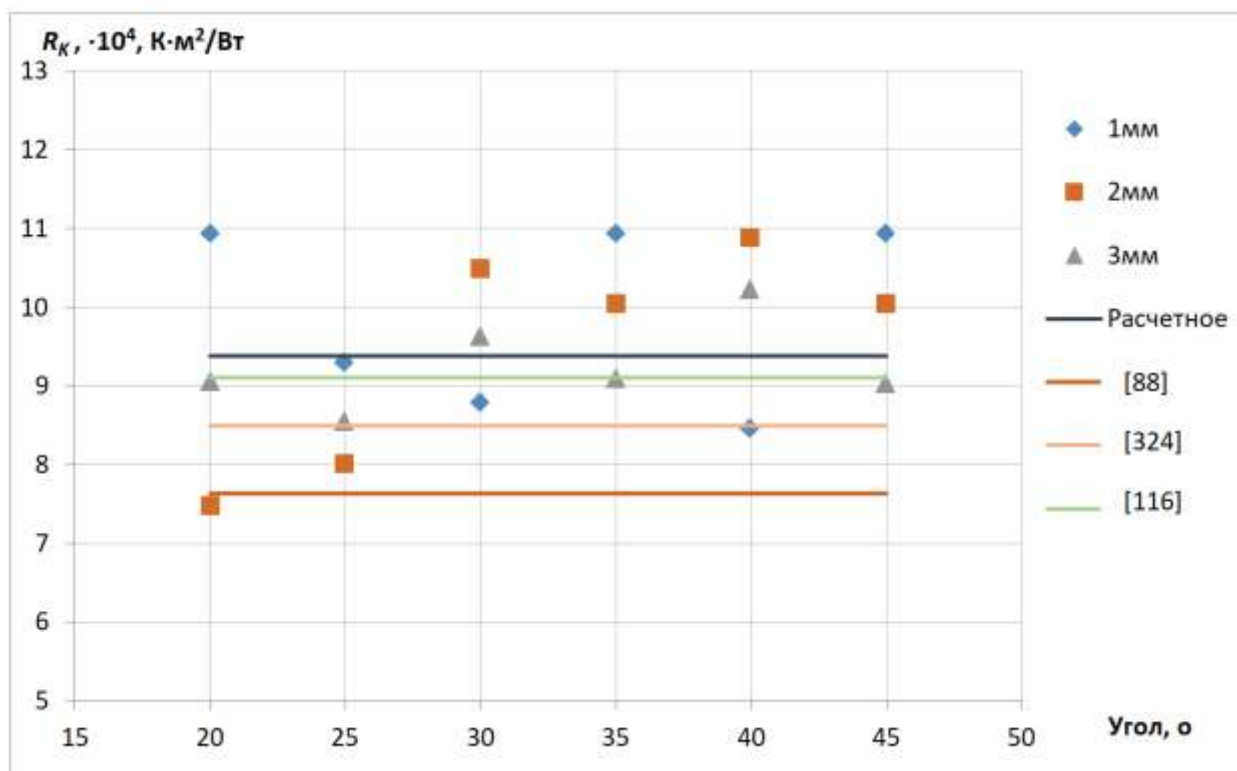


Рис. 5.4. КТС пары 12X10H8Т - 12X10H8Т в вакууме при  $T_k=150^\circ\text{C}$ ,  $P_k=2,5$  МПа.

Сравнение с известными расчетными формулами и выборка результатов расчетов позволяют сделать вывод, что наиболее достоверные результаты и меньший разброс данных происходит при выборе угла  $\Theta$  в районе  $25^\circ$ - $30^\circ$ , и базовой длине 3 мм.

## Выводы по Главе 5

В пятой главе диссертации решена задача контактного теплообмена сопрягаемых шероховатых поверхностей с учётом многоуровневой геометрии контакта и физических механизмов переноса теплоты. Показано, что в условиях установившегося теплового режима линии теплового потока стягиваются к областям фактического контакта — сначала к макropriятнам, обусловленным волнистостью, затем к микропятнам, формируемым шероховатостью. Определена толщина зоны возмущения температурного поля вблизи средней плоскости контакта и соответствующее время релаксации, позволяющее применять классическую теорию теплопроводности в нестационарных режимах, если характерное время процесса превышает время релаксации.

Установлено, что контактное термическое сопротивление преимущественно определяется совокупным вкладом теплопроводности в точках фактического контакта, теплопередачи через среду в зазорах и теплового излучения. На основе анализа показано, что в большинстве практических случаев вклад излучения не превышает 2–3 %. Однако в условиях вакуума, низких давлений и при малых зазорах (сравнимых с длиной волны излучения) следует учитывать эффекты ближнепольного теплового излучения, описываемые методами флуктуационной электродинамики.

Разработана и программно реализована тепловая фрактальная модель контактного теплообмена, в которой учтены упругие, упругопластические и пластические деформации микроконтактов. На её основе получены аналитические выражения для контактной термической проводимости одиночного микроконтакта и суммарной проводимости всей контактной зоны. Предложена процедура расчёта общего контактного термического сопротивления, позволяющая учитывать статистическую природу распределения пятен контакта и геометрию микрорельефа.

Для верификации аналитических выражений и учёта реальной геометрии контакта выполнено численное моделирование методом конечных элементов на основе макета цифрового двойника микрорельефа. В ходе численного

эксперимента определены поля температур и плотности теплового потока в образцах при различных параметрах шероховатости и контактного давления. Показано, что выбор угла сглаживания сеточной модели  $\Theta$  в диапазоне  $25\text{--}30^\circ$  и базовой длины выборки 3 мм обеспечивает наилучшее согласование с известными аналитическими зависимостями и минимизирует разброс расчётных значений контактного термического сопротивления.

Таким образом, интеграция фрактального подхода, уточнённого учёта вклада излучения и численного моделирования на основе цифрового двойника позволила снизить неопределённость расчётов контактного термического сопротивления и повысить достоверность прогнозирования тепловых режимов в соединениях деталей.

## ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КОНТАКТНУЮ ТЕРМИЧЕСКУЮ ПРОВОДИМОСТЬ

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, накопленные за десятилетия практики в области теплопередачи, убедительно показывают, что величина контактного термического сопротивления (КТС) между сопряжёнными твёрдыми поверхностями определяется совокупностью взаимосвязанных факторов. Среди ключевых параметров, оказывающих определяющее влияние на КТС, выделяют: физико-механические свойства материалов, нормальное контактное давление, микрогеометрию (шероховатость) сопрягаемых поверхностей, температуру в зоне контакта, а также природу межфазной среды, заполняющей зазоры между микронеровностями.

*Физико-механические свойства материалов.*

Наиболее значимыми характеристиками в контексте формирования КТС являются модуль упругости, микротвёрдость и коэффициент теплопроводности. Эти параметры напрямую определяют характер деформации микронеровностей при сжатии: более мягкие и пластичные материалы склонны к увеличению реальной площади контакта за счёт пластической деформации выступов, в то время как упругие и твёрдые материалы сохраняют значительные воздушные зазоры. Кроме того, теплопроводность материала влияет на распределение температурного поля вблизи контакта, что в совокупности определяет эффективность теплопередачи через границу раздела.

*Нормальное контактное давление.*

При увеличении внешней нагрузки, прижимающей поверхности друг к другу, происходит постепенное «включение» в контакт ранее разобшённых микровыступов. Это приводит к росту реальной площади теплопередающего контакта и, как следствие, к снижению контактного термического сопротивления. Однако зависимость эта нелинейна: на начальных этапах нагружения эффект наиболее выражен, тогда как при высоких давлениях наблюдается насыщение — дальнейшее увеличение нагрузки даёт всё меньший прирост площади контакта.

### *Шероховатость поверхностей и межфазная среда.*

Микрорельеф сопрягаемых поверхностей определяет геометрию и объём воздушных (или иных) зазоров, через которые осуществляется в основном радиационный и конвективный (в случае газа) теплообмен — оба механизма значительно менее эффективны по сравнению с теплопроводностью твёрдых тел. Заполнение этих зазоров промежуточной средой (например, теплопроводящей пастой, маслом или инертным газом) кардинально изменяет тепловое сопротивление: чем выше теплопроводность среды и чем тоньше остаточные зазоры, тем ниже КТС.

Температура в зоне контакта.

*Температурное поле вблизи границы раздела* оказывает двойственное влияние. Во-первых, с ростом температуры изменяются физические свойства материалов — снижается модуль упругости, возрастает пластичность, что способствует увеличению реальной площади контакта. Во-вторых, при высоких температурах могут активизироваться процессы термического расширения, окисления или диффузии, дополнительно модифицирующие структуру и тепловые характеристики контактной зоны.

Таким образом, контактное термическое сопротивление — это не просто геометрический или материалозависимый параметр, а сложная функция термомеханического состояния системы, требующая комплексного подхода при проектировании и анализе тепловых узлов. Далее, на основе более чем 2500 численных расчётов, в зависимости от эквивалентной теплопроводности  $\lambda_{eq}$  в Вт/(м·К), модулей Юнга материалов более нагретой  $E_1$  и менее нагретой  $E_2$  поверхностей в ГПа и от прижимающего давления  $P$  в МПа, Температуры контакта и микрогеометрии поверхности, представлено влияние соответствующих величин на КТС.



## 6.1 Влияние геометрии микрорельефа на контактный теплообмен

### *Влияние макрошероховатости на контактный теплообмен*

Зависимость между шероховатостью поверхности и термическим сопротивлением контакта. Шероховатость поверхности отражает плоскостность поверхности твердого тела. Для двух контактирующих поверхностей основным фактором, который может повлиять на фактическую площадь контакта, является волнистость поверхности. Таким образом, на микроскопическом уровне шероховатость поверхности также влияет на фактическую площадь контакта. Еще один важный фактор. На рисунке 6.1 показана взаимосвязь между шероховатостью поверхности и термическим сопротивлением поверхности контакта.

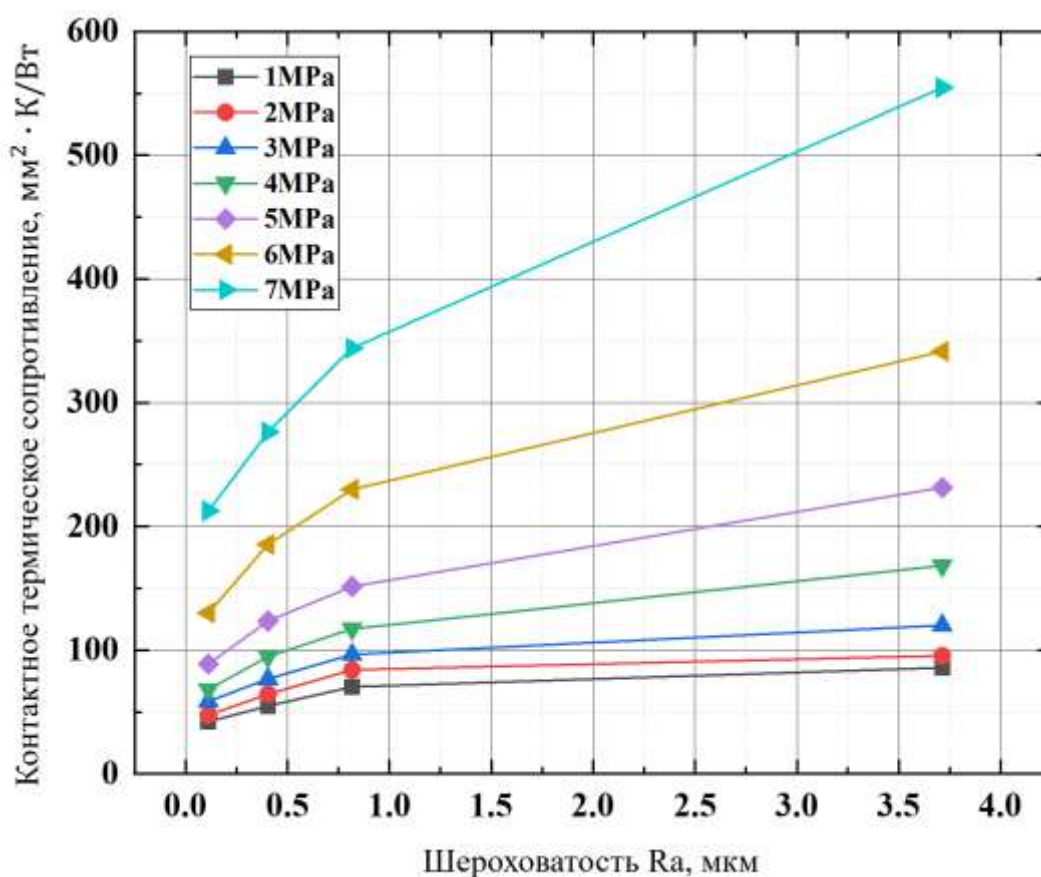


Рис. 6.1. Взаимосвязь между шероховатостью и термическим сопротивлением

Из рисунка 6.1. видно, что контактное тепловое сопротивление поверхности раздела твердое тело-твердое тело уменьшается с увеличением шероховатости поверхности, поскольку, когда шероховатость поверхности различна, площадь

контакта небольших выпуклых тел на разных поверхностях раздела различна. Если шероховатость больше, фактическая площадь контакта будет меньше, чем площадь контакта с меньшей шероховатостью, что приведет к увеличению термического сопротивления поверхности контакта. Разница в термическом сопротивлении контакта между различными шероховатостями поверхности связана с давлением. Из рисунка видно, что при небольшом давлении разница между верхней и нижней кривыми больше, а при увеличении давления разница между кривыми становится меньше. Это показывает, что по сравнению с давлением влияние шероховатости поверхности раздела на тепловое сопротивление незначительно.

## 6.2 Влияние микрогеометрии на контактный теплообмен

После создания макета цифрового двойника контактной пары, производится тепло-прочностной анализ контактной пары. Результаты расчета КТС для межконтактной температуры  $300^{\circ}\text{C}$  в диапазоне сжимающей нагрузки от 0,1 МПа до 1 МПа при параметре фильтрации дельта равной  $2,0 \cdot Ra$  и  $0,75 \cdot Ra$  представлены на рисунке 6.2.

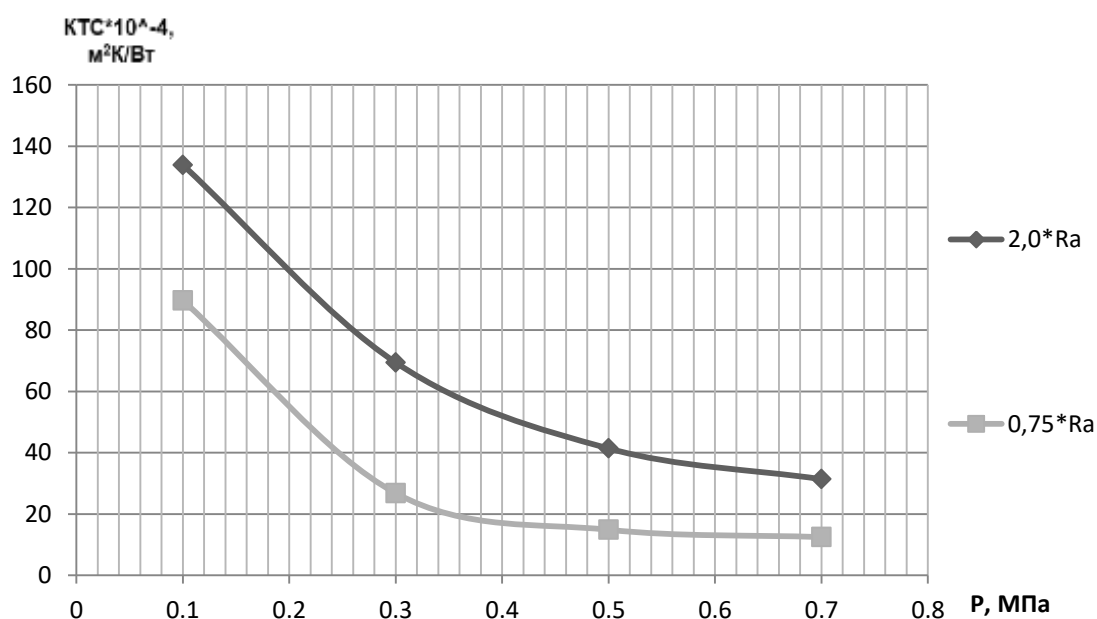


Рис. 6.2. График зависимости КТС от давления при  $T=300^{\circ}\text{C}$

На рисунке 6.3 наглядно отображены значения КТС при  $\delta = 2 \cdot Ra$  и  $\delta = 0,75 \cdot Ra$  в зависимости от температуры в зоне контакта при сжимающем давлении 0,3 МПа.

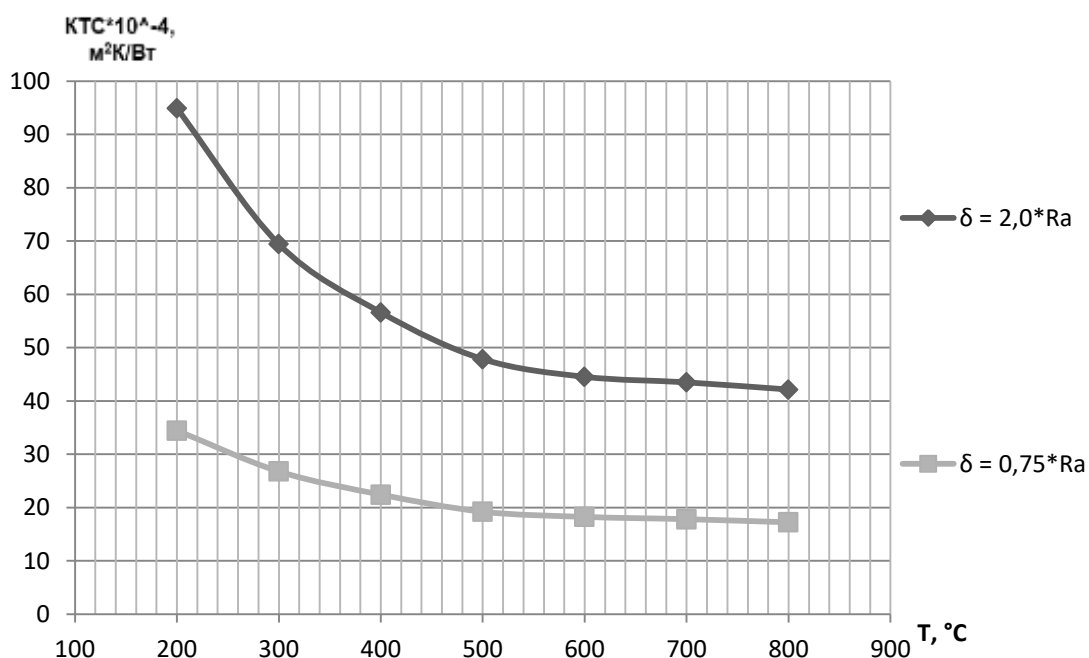


Рис. 6.3. График зависимости КТС от температуры при  $P=0,3$  МПа

При дальнейшем увеличении сжимающей нагрузки происходит уменьшение значения КТС, в связи с тем, что увеличиваются пластические деформации поверхностей и возрастает площадь реального контакта. На рисунке 6.4 приведен график зависимости значения КТС при  $\delta$  равной 2 и 0,75, а также, значения КТС, рассчитанные по аналитическим зависимостям других авторов, в зависимости от температуры в зоне контакта при сжимающем давлении 0,5 МПа.

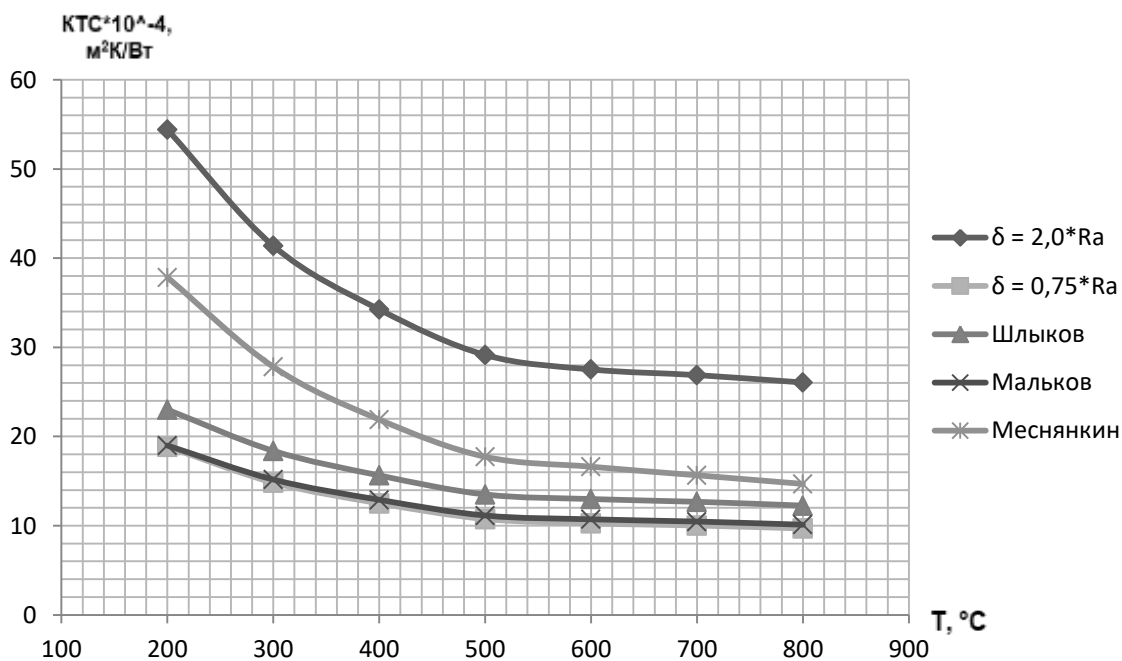


Рис. 6.4. График зависимости КТС от температуры при  $P=0,5$  МПа

По результатам проведенных исследований можно увидеть, что не смотря на одинаковые граничные условия и исходные данные, качество обработки микрогеометрических особенностей поверхности существенно влияет на площадь реального контакта. В связи с тем, что тепловой поток на контакте шероховатых поверхностей течет как через фактические точки контакта, так и вследствие переизлучения между контактирующими поверхностями [367], влияние фактической площади контакта и ориентации площади повторно-излучающие поверхности имеют решающее значение при определении теплопроводности контакта. Уменьшение шага выборки  $\delta$  приближает получаемые результаты к аналитическим зависимостям, построенным по экспериментальным данным, однако увеличивает время расчёта и необходимую для его проведения мощность. Поэтому, существует необходимость подробного изучения этого влияния и нахождения параметра фильтрации оптимального для сохранения точности и скорости обработки. А также для проверки на адекватность следующим шагом предполагается провести экспериментальное подтверждение и сравнительный анализ с результатами идентичных экспериментов. Результаты комплексного расчёта представлены на рис. 6.5.

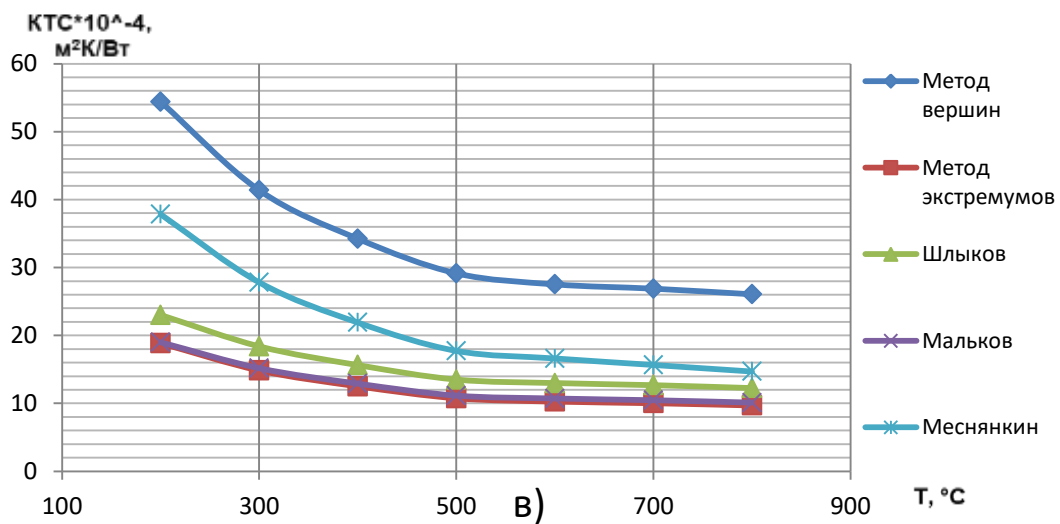
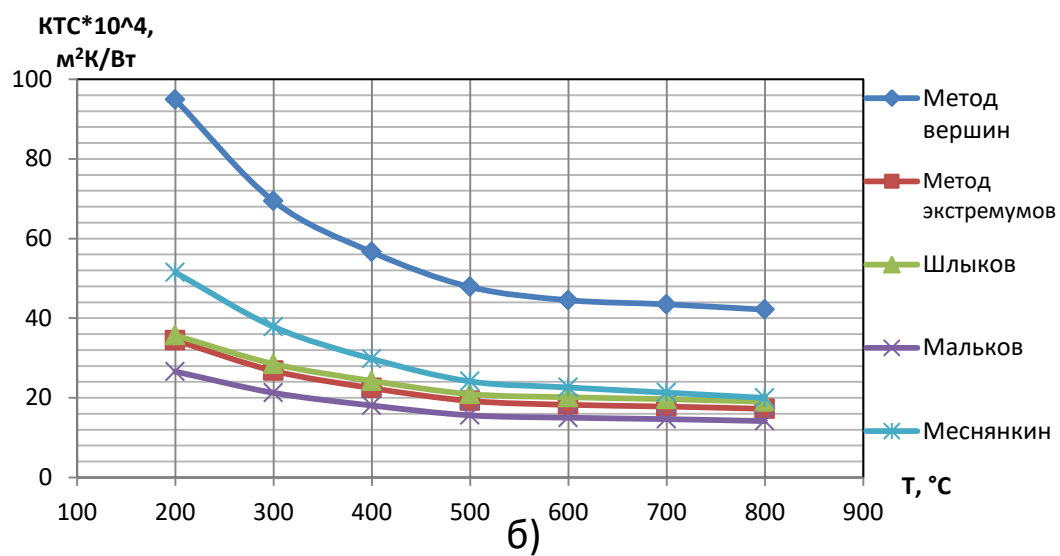
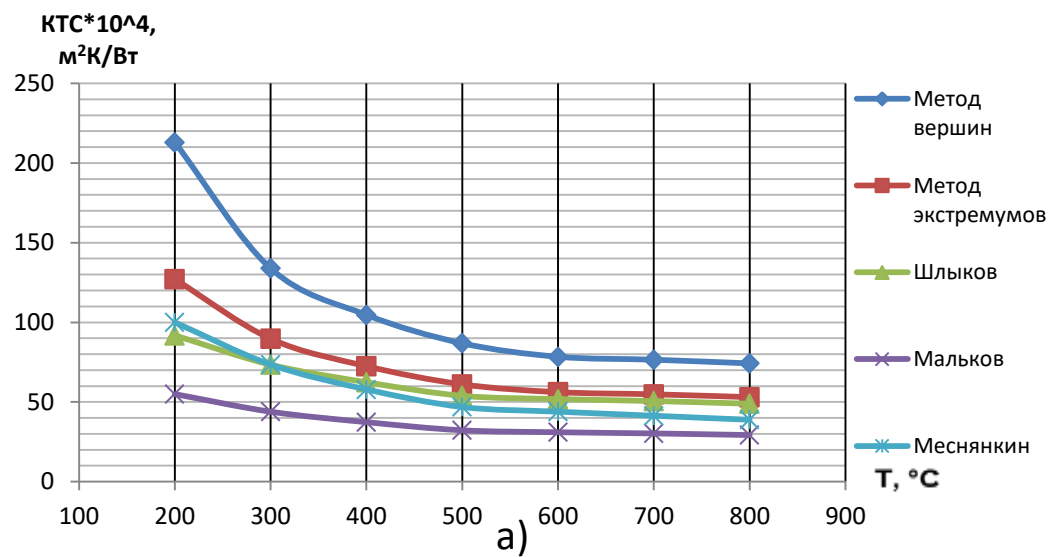


Рис. 6.5. График КТС от температуры для а)  $P=0,1$  МПа, б)  $P=0,3$  МПа, в)  $P=0,5$  МПа

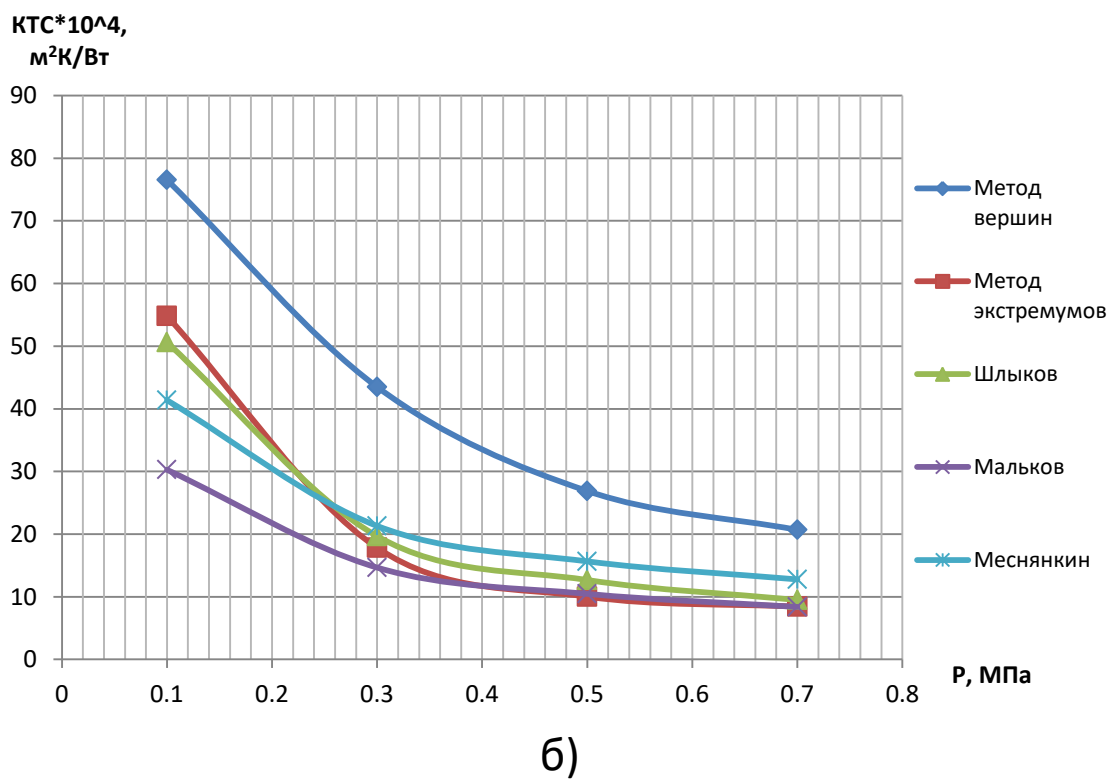
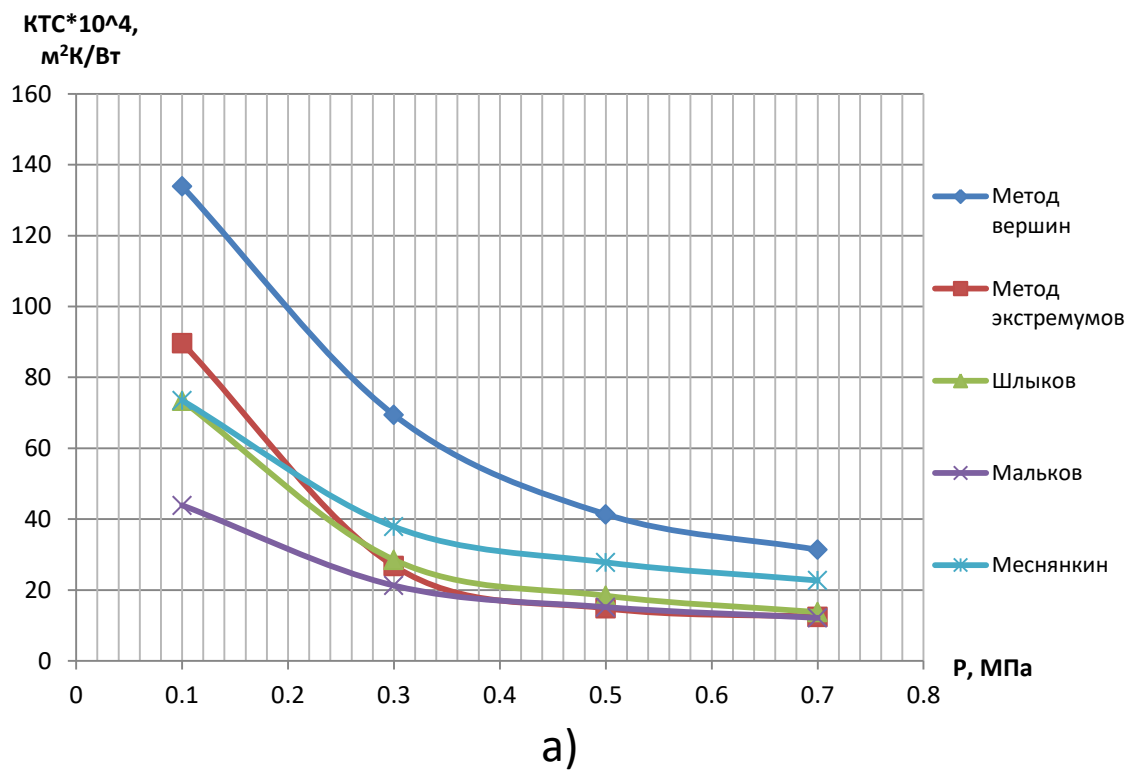


Рис. 6.6. График КТС от давления при а)  $T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , б)  $T = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 6.1. Сравнение экспериментальных и расчётных данных для КТС.

| Р, Па     | КТС<br>эксперимент, | КТС<br>$\delta=2,2Ra$ | КТС<br>$\delta=5Ra$ | Отклонение<br>$\delta=2,2Ra$ от<br>эксперимента,<br>% | Отклонение<br>$\delta=5Ra$ от<br>эксперимента,<br>% |
|-----------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 367775,24 | 12,62               | 12,48                 | 13,44               | 1,06                                                  | 6,53                                                |
| 298383,69 | 12,82               | 12,92                 | 13,50               | 0,79                                                  | 5,30                                                |
| 228992,13 | 13,02               | 13,36                 | 13,56               | 2,59                                                  | 4,10                                                |
| 159600,58 | 13,28               | 13,58                 | 13,73               | 2,24                                                  | 3,32                                                |
| 90209,022 | 13,55               | 13,80                 | 13,89               | 1,90                                                  | 2,57                                                |

### 6.3 Влияние давления на границе раздела фаз на контактный теплообмен

Зависимость между давлением на границе раздела фаз и контактным тепловым сопротивлением. Давление на границе раздела фаз влияет на важный фактор термического сопротивления контакта твердое тело-твердое тело. Давление на границе раздела фаз в основном влияет на термическое сопротивление контакта фаз, изменяя фактическую площадь контакта контактной поверхности. В этом моделировании давление варьируется от 0,8 МПа до 7 МПа. Предыдущие исследования показали, что давление на границе раздела фаз, как правило, зависит от коэффициента мощности. Величина показателя мощности отражает влияние давления на сопротивление теплового контакта. На рисунке 6.7 показана кривая зависимости термического сопротивления поверхности раздела фаз из алюминия 3А21 от давления.

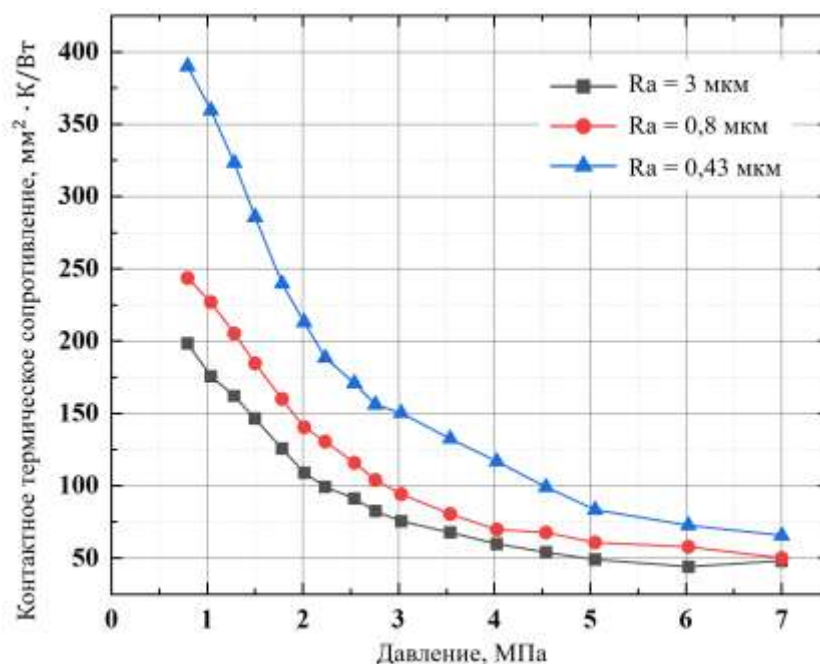


Рис. 6.7. Влияние давления на границе раздела фаз на КТС.

Из рисунка 6.7 видно, что контактное тепловое сопротивление поверхности раздела твердое тело – твердое тело уменьшается с увеличением давления на границе раздела. Это происходит потому, что изменение давления на границе раздела вызывает деформацию крошечных выступов на границе раздела контактов, в результате чего фактическая площадь контакта увеличивается, что, в свою очередь, приводит к снижению теплового сопротивления границы раздела контактов.

#### 6.4 Влияние свойств материала на контактное тепловое сопротивление

Из рисунка 6.8 выше видно, что теплопроводность материала может влиять на контактное тепловое сопротивление поверхности раздела, и при тех же других условиях, чем больше теплопроводность материала, тем меньше контактное тепловое сопротивление поверхности раздела. Теплопроводность твердого тела в основном влияет на его собственную теплопроводность, что влияет на тепловое сопротивление поверхности раздела фаз.



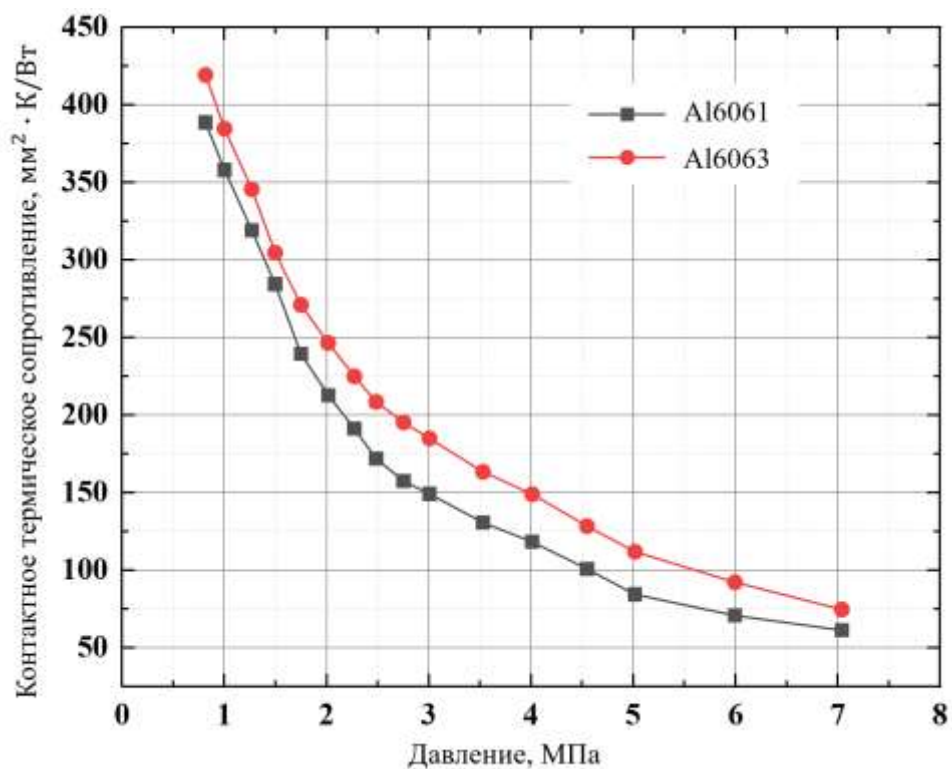


Рис. 6.8. Влияние теплофизических свойств материала на КТС

Как правило, передача тепла в металлических материалах осуществляется двумя способами: колебаниями кристаллической решетки и миграцией свободных электронов в материале. Влияние миграции электронов. Когда поверхность раздела твердое тело-твердое тело находится в контакте, передача тепла от одного образца к другому происходит главным образом за счет столкновения свободных электронов, обеспечивающих теплопередачу. Чем выше теплопроводность материала, тем больше плотность свободных электронов внутри него, тем интенсивнее миграция и тем лучше теплопроводность. Таким образом, тепловое сопротивление невелико, а тепловое сопротивление велико.

## 6.5 Влияние температуры на контактное тепловое сопротивление

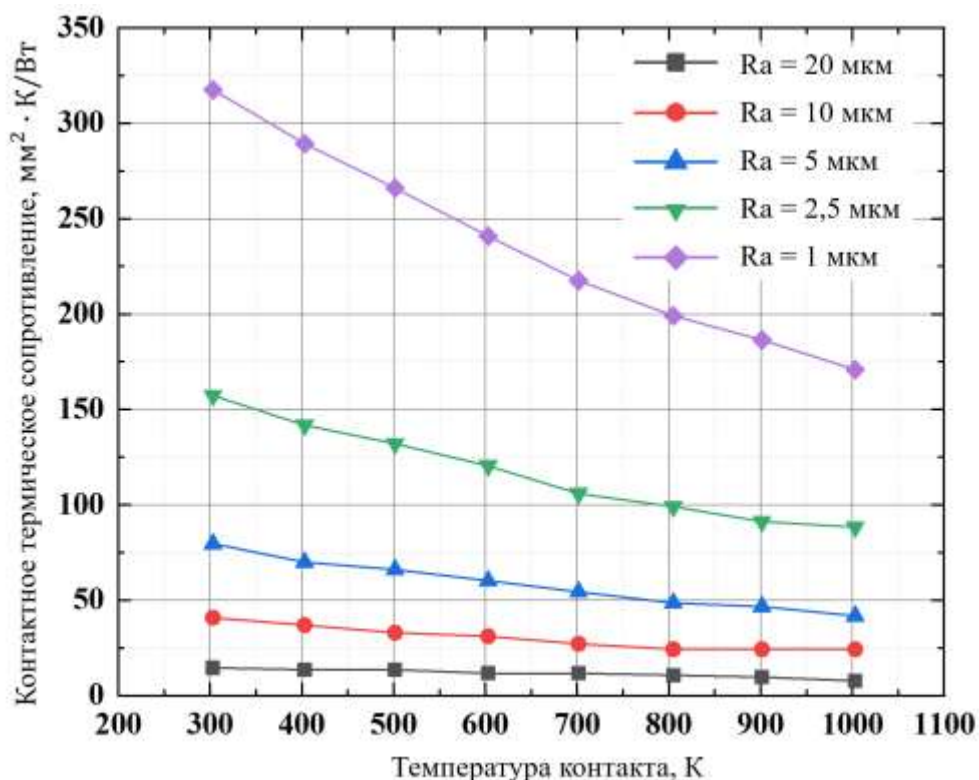


Рис. 6.9. Влияние температуры контакта на  $KTC$

Из рисунка 6.9 видно, что с повышением температуры поверхности контакта тепловое сопротивление контакта постепенно уменьшается. Это связано с тем, что чем выше температура, тем более очевидным является эффект теплового излучения через зазор на границе раздела, и чем больше шероховатость поверхности, тем более очевидным является этот эффект.

## 6.6 Влияние лучистого теплообмена между соприкасающимися поверхностями на контактный теплообмен

В виду наличия нелинейной зависимости излучения от температуры поверхности, передача теплового потока между соседними поверхностями за счет излучения в области контакта оказывает серьезное влияние на общую картину передачи теплового потока. Основная особенность заключается в том, что микрогеометрия соприкасающихся поверхностей имеет сложную криволинейную форму, что приводит к необходимости учёта углов падения потока лучистого теплообмена. Учёт данного явления осуществляется введением дополнительного

граничного условия между поверхностями контакта, которое учитывает параметры формы микрогеометрии. Учёт формы микрогеометрии происходит за счет применения углового коэффициента  $F_{ij}$  (см. рис. 6.10) [368].

Угловой коэффициент определяется как часть полного лучистого теплового потока, который исходит от поверхности  $i$ , и который поступает непосредственно на поверхность  $j$ . Он описывается следующим уравнением:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} d(A_j) d(A_i) \quad \#(6.1)$$

где  $A_i$ ,  $A_j$  – площади  $i$  и  $j$  поверхностей,  $r$  – расстояние между  $i$  и  $j$  поверхностями,  $\theta_i$  – угол между нормалью к поверхности  $i$  и отрезком  $r$ ,  $\theta_j$  – угол между нормалью к поверхности  $j$  и отрезком  $r$ .

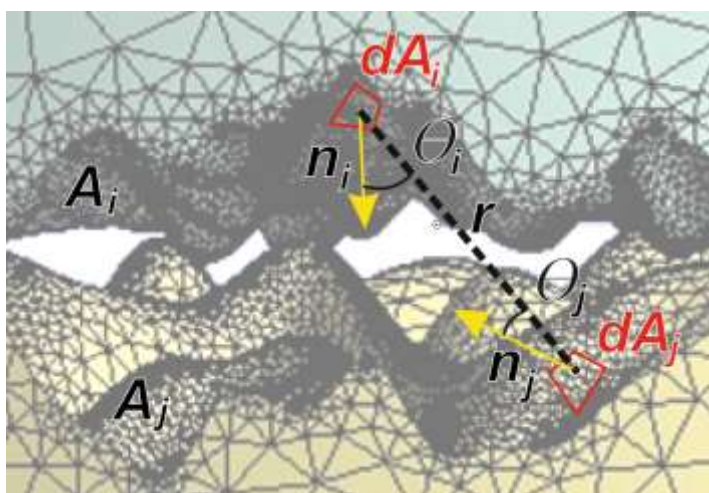


Рис. 6.10. Графическая иллюстрация взаимодействия двух поверхностей при лучистом теплообмене.

Для определения теплового потока за счет лучистого теплообмена, используются закон Стефана-Больцмана для серого тела с учетом углового коэффициента

$$Q_i = \sigma \varepsilon_i F_{ij} A_i \cdot (T_i^4 - T_j^4) \quad \#(6.2)$$

где  $\varepsilon_i$  – степень черноты  $i$ -й поверхности;  $F_{ij}$  – фактор обзора;  $A_i$  – площадь  $i$ -й поверхности;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T_i$  и  $T_j$  температуры  $i$ -й и  $j$ -й поверхностей.

За последние 50 лет различными авторами проведено множество экспериментов для определения значения КТС и формирование эмпирических зависимостей КТС от различного рода факторов. Благодаря их исследованиям и полученным ими аналитическим зависимостям, предоставляется возможным провести первичную оценку результатов моделирования и прогнозирования значения КТС. В данной работе так же приводится сравнение с аналитическими зависимостями контактного сопротивления от давления и характеристик материала трех авторов [88,115,324].

Тем не менее, известные аналитические зависимости по определению КТС ориентированы на специфические условия контакта, и применимы в ограниченном диапазоне межконтактных давлений и температур, которых могли быть реализованы при проведении экспериментов [114,115,123, 322, 324, 367, 369 - 372]. Как следствие такого подхода в определении значений контактных термических сопротивлений, а так же утверждений ряда авторов, что вклад лучистого теплообмена при температуре в межконтактной области до 1000 К не имеет существенного значения и составляет менее 1% [373], вводит в сомнения при использовании той или иной зависимости.

Задача определения механики взаимодействия микронеровностей контактирующих поверхностей и взаимного расположения выступов и впадин наиболее полно может быть решена объёмном виде. Решение задачи построения трехмерной геометрии контактирующей шероховатой поверхности может быть выполнено по данным, полученным из профилограммы поверхности. В основе используемой методики расчета КТС с учётом излучения лежит методика, подробно описанная в работах [1-25], которая сводится к выполнению ряда последовательных действий, а именно:

- определение шероховатости контактирующих поверхностей;
- твердотельное моделирование шероховатых поверхностей;
- трехмерный анализ механики деформирования в местах контакта микронеровностей;

- трехмерный тепловой анализ контакта с учетом переизлучения в межконтактной зоне.

В данном разделе в качестве примера использования такой методики приведены результаты контактного термического сопротивления пары материалов и нержавеющей стали 12X18H10T с композитным материалом КМК-МС, имеющих шероховатости 0,82 мкм (см. рис. 6.11) и 2,07 мкм (см. рис. 6.12) полученных с использованием профилометра Mitutoyo Surftest SJ-210.

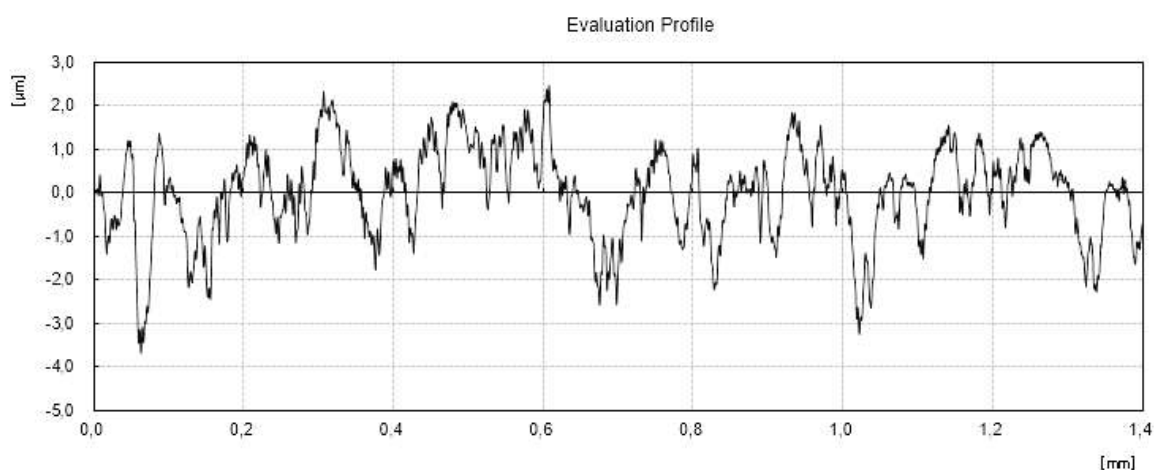


Рис. 6.11. Профилограмма поверхности контакта 12X18H10T с  $R_a = 0,82$  мкм

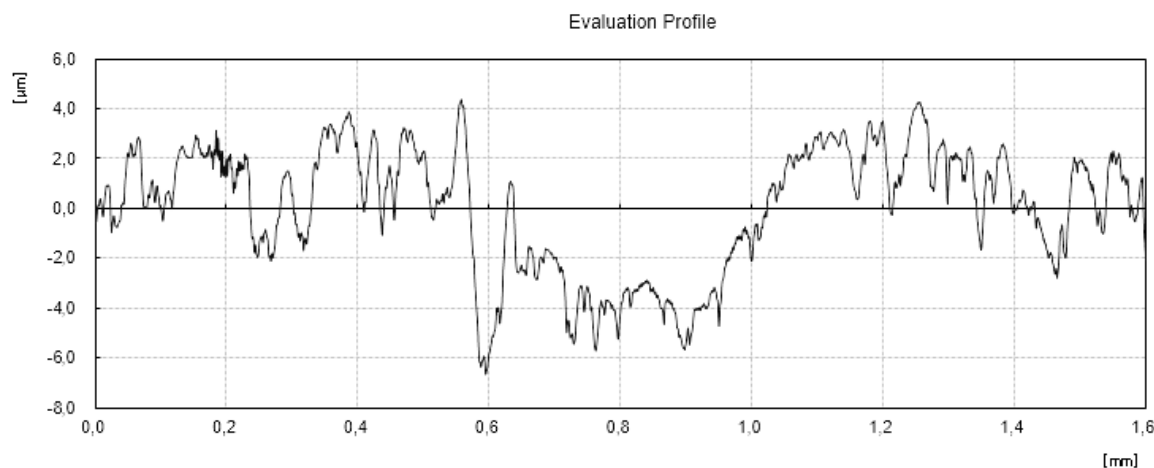


Рис. 6.12. Профилограмма поверхности контакта КМК-МС с  $R_a = 2,07$  мкм

Трехмерные модели микронеровностей моделируются на базе облака точек сформированным при помощи авторского программного обеспечения [76]. Результат построения трехмерной модели микрорельефа одной из поверхностей приведен на рисунке 6.13.

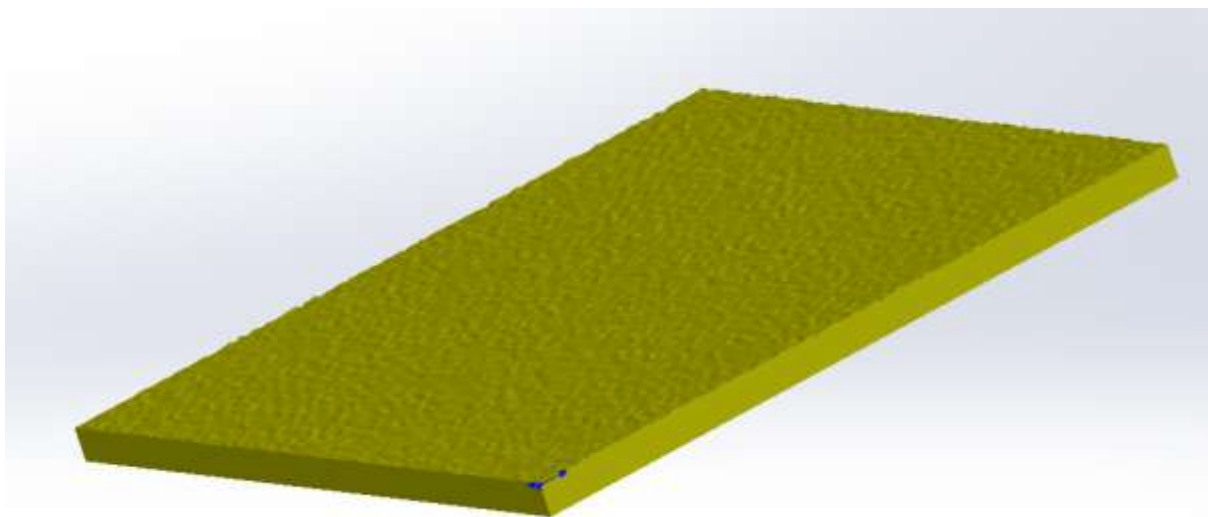


Рис. 6.13. Трехмерная модель микрорельефа поверхности с  $Ra = 0,82$  мкм

Для дальнейшего трехмерного анализа механики деформирования в местах контакта микронеровностей и теплового анализа контакта с учетом лучистого теплообмена в межконтактной зоне необходимо построение расчетной сеточной модели. Данный этап происходит в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS. Результат построения расчетной сеточной модели, с заданными настройками сеточной модели, представлен на рисунке 6.14.

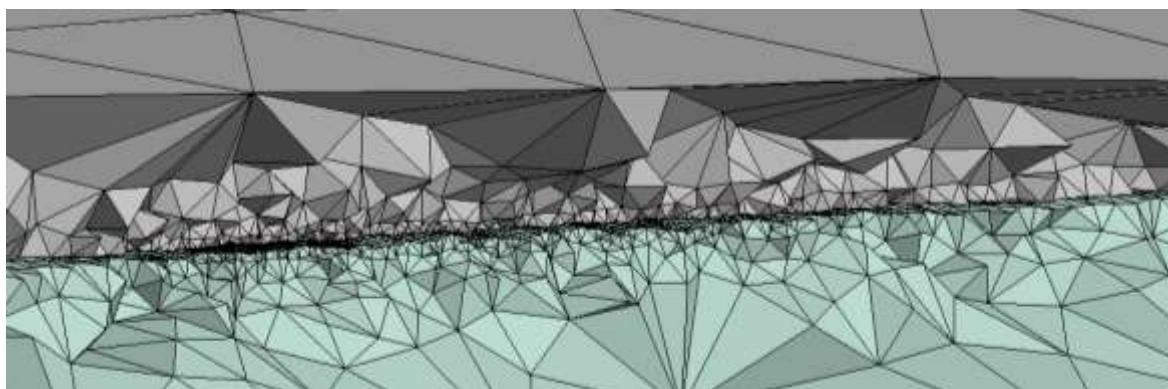


Рис. 6.14. Расчетная сеточная модель микрогеометрии контакта (поперечный разрез)

После выполнения численного моделирования механического и теплового взаимодействия контактных поверхностей, на основе средних температур поверхности обратных сторон моделей, производилось определение значения КТС. Результаты расчетов КТС от сжимающего давления в диапазоне от 0,14 МПа до 2,0 МПа при температуре в зоне контакта 473 К и 1073 К представлены на рисунках 6.15 и 6.16 соответственно, а также в таблице 6.2.

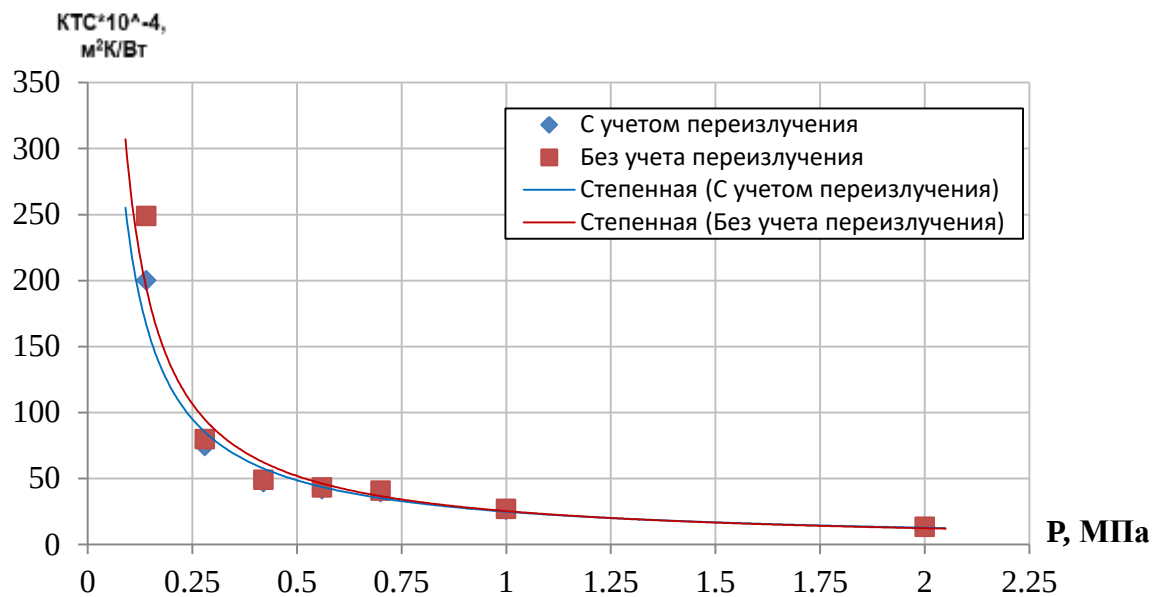


Рис. 6.15. Зависимость КТС от сжимающего давления при температуре в зоне контакта 473 К

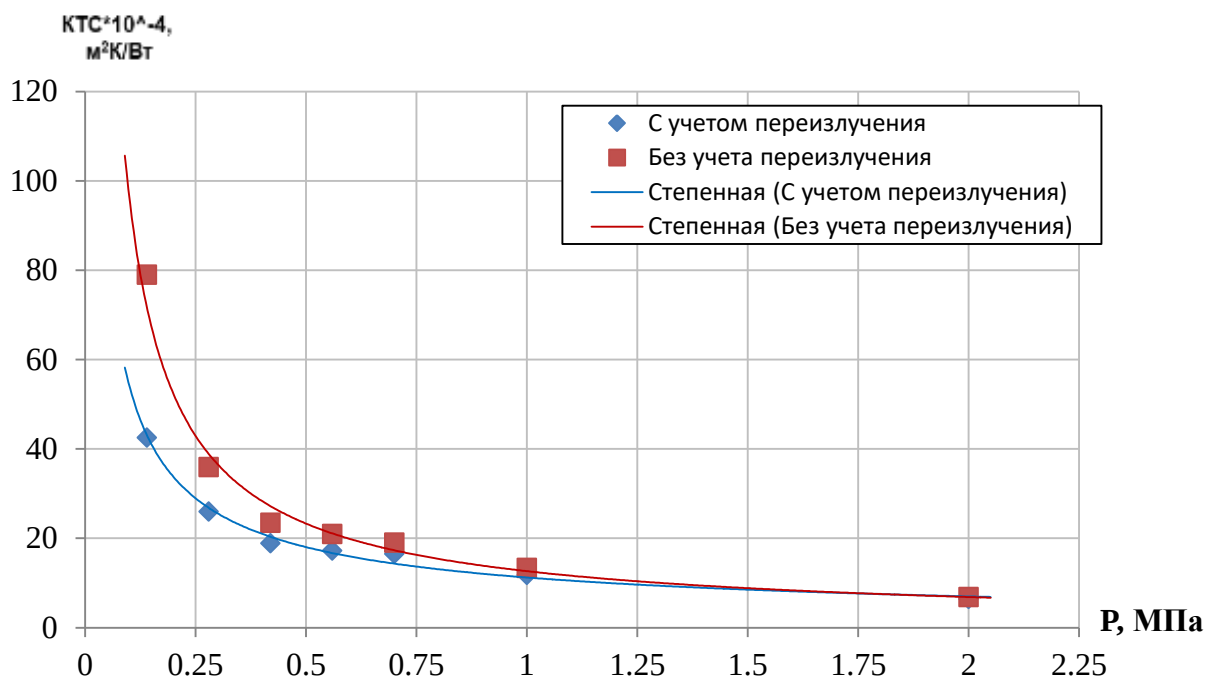


Рис. 6.16. Зависимость КТС от сжимающего давления при температуре в зоне контакта 1073 К



Таблица 6.2. Результаты вычислений КТС с учетом и без влияния лучистого теплообмена

| Температура в зоне контакта | К                          | 473   | 573   | 673   | 773   | 873   | 973   | 1073  |
|-----------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,14 МПа                    |                            |       |       |       |       |       |       |       |
| КТС с учётом излучения      | $10^4$ м <sup>2</sup> К/Вт | 200   | 117,5 | 86,15 | 66,87 | 56,25 | 49,16 | 42,49 |
| КТС без учёта излучения     | $10^4$ м <sup>2</sup> К/Вт | 248,7 | 146,8 | 112,5 | 92,43 | 83,07 | 81,25 | 78,98 |
| Разница                     | %                          | 19,6  | 20,0  | 23,4  | 27,7  | 32,3  | 39,5  | 46,2  |
| 2 МПа                       |                            |       |       |       |       |       |       |       |
| КТС с учётом излучения      | $10^4$ м <sup>2</sup> К/Вт | 13,22 | 10,27 | 8,52  | 7,23  | 6,89  | 6,66  | 6,37  |
| КТС без учёта излучения     | $10^4$ м <sup>2</sup> К/Вт | 13,37 | 10,44 | 8,70  | 7,43  | 7,15  | 7,00  | 6,80  |
| Разница                     | %                          | 1,1   | 1,6   | 2,1   | 2,7   | 3,7   | 4,9   | 6,3   |

Как видно из рисунков 6.15 и 6.16 и таблицы 6.2 игнорирование вклада переноса теплоты за счет излучения ведет к существенной ошибке в определении КТС. Это особенно заметно выражено при низких значениях сжимающих нагрузок, что очевидно, так как в контакт вступает лишь малая часть номинальной площади контакта и существенное количество теплоты передается за счет излучения, что наглядно продемонстрировано на картинах формирования температурных полей поверхностей контакта (см. рис. 6.17).

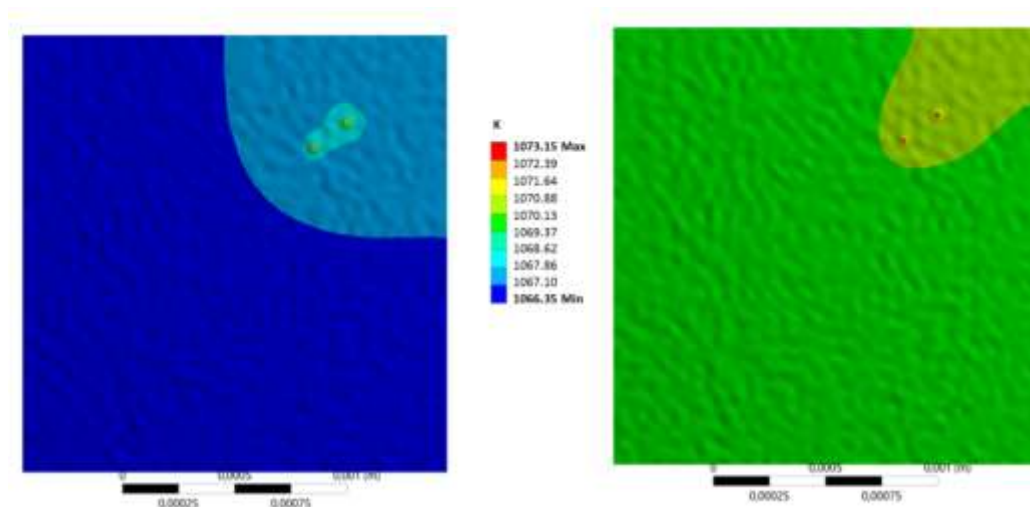


Рис. 6.17. Распределение поля температур без учета (слева) и с учетом (справа) механизма излучения в зоне контакта при сжимающей нагрузке 0,14 МПа.



Дальнейший рост сжимающей нагрузки приводит к резкому повышению площади фактического контакта, в контакт вступают новые вершины контактирующих поверхностей. Данное явление отчетливо проиллюстрировано на рисунке 6.18.

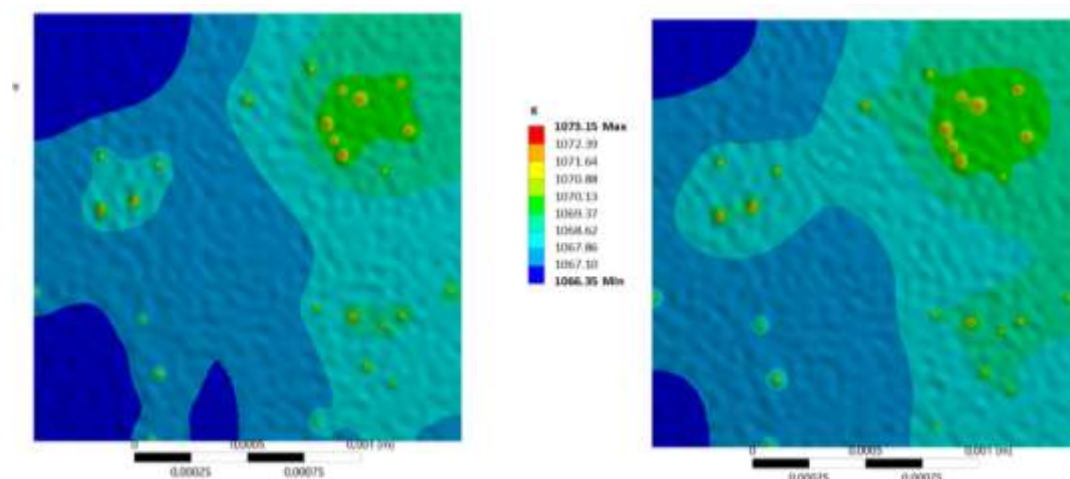


Рис. 6.18 Распределение поля температур без учета (слева) и с учетом (справа) механизма излучения в зоне контакта при сжимающей нагрузке 2 МПа.

Сравнение с известными аналитическими зависимостями авторов [116, 324, 88] наглядно демонстрирует, что при низких значениях сжимающего давления, а также при приближении температуры в межконтактной к 1000 К разница в определении КТС существенная (см. рис. 6.19 и 6.20).

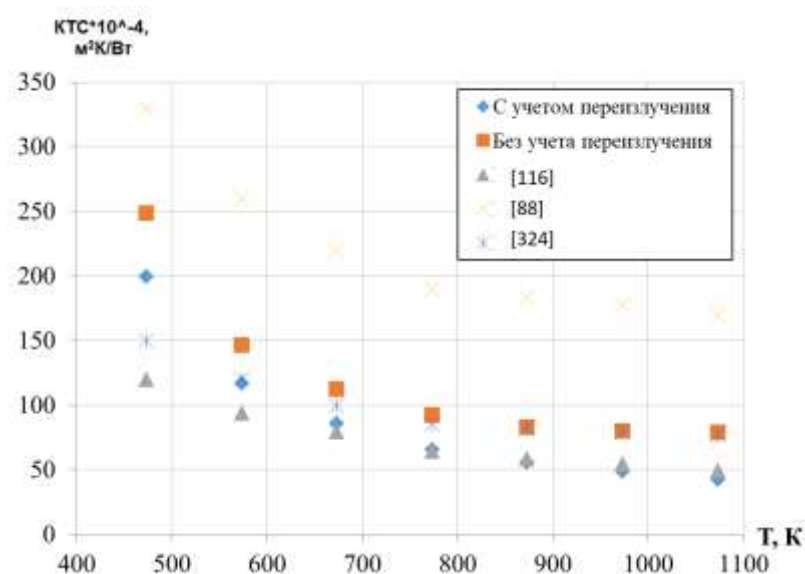


Рис. 6.19. Значения КТС при величине сжимающей нагрузки 0,14 МПа

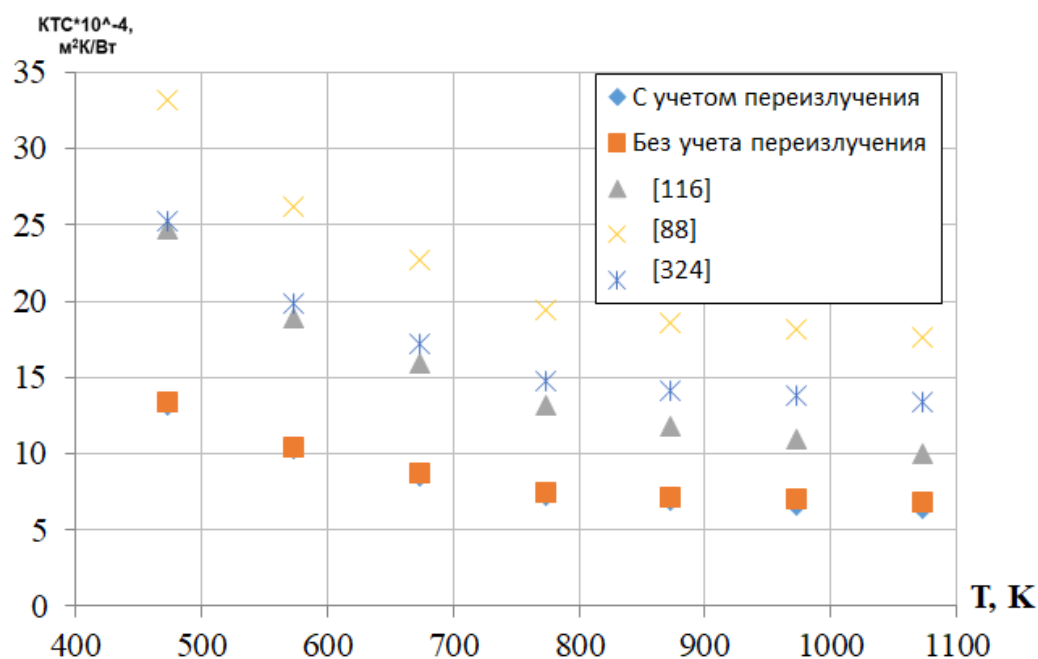


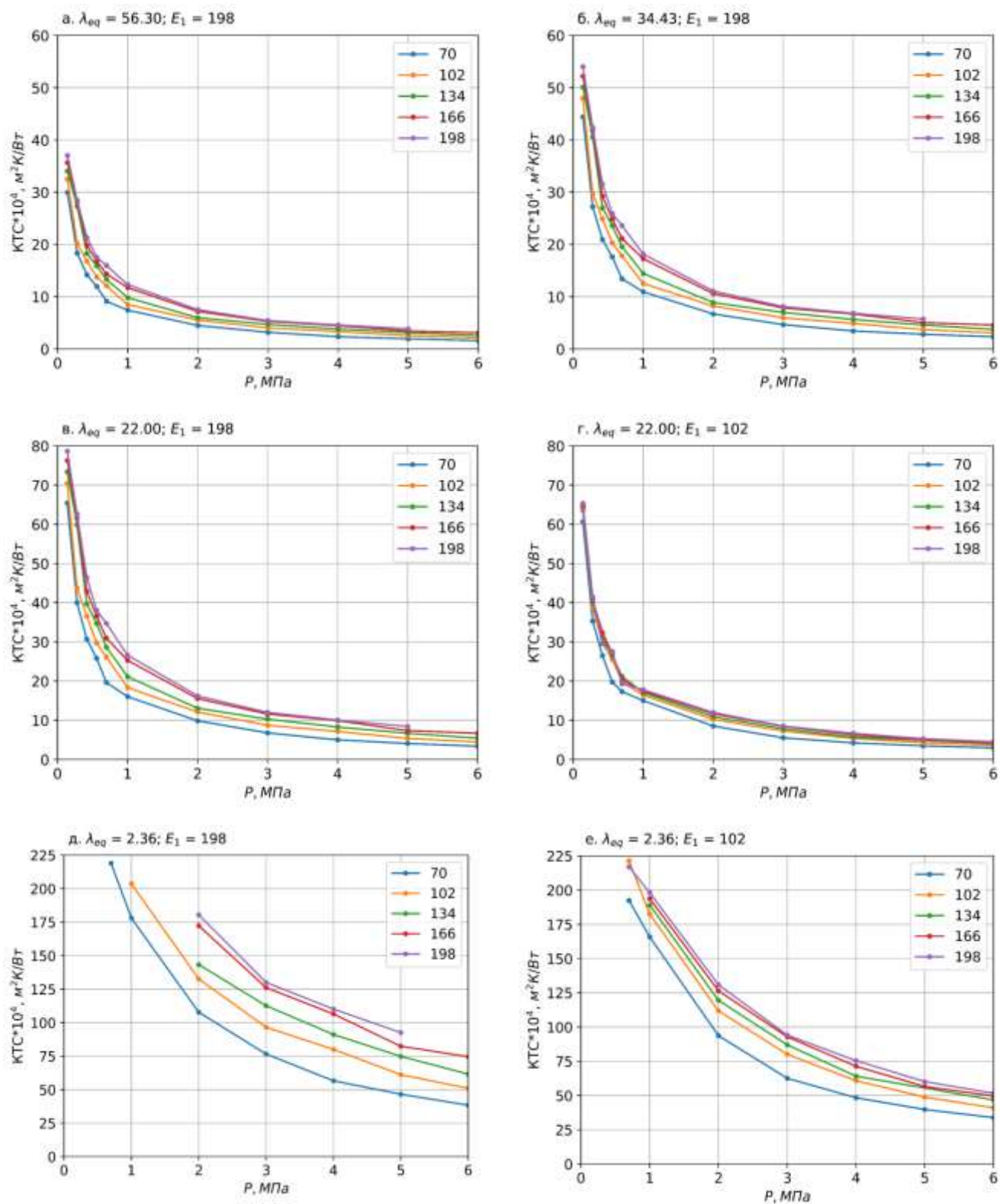
Рис. 6.20. Значения КТС при величине сжимающей нагрузки 2,0 МПа

Проведенный анализ наглядно демонстрирует, что при высоких температурах и низких сжимающих давлениях теплообмен в зоне контактного соединения, особенно в безвоздушной среде, во многом определяется величиной теплового потока за счет лучистого теплообмена. Для элементов конструкций, имеющих ограничения по допустимым механическим напряжениям, ошибка в определении величины тепла, передаваемого за счет излучения, может привести к существенной погрешности в определении контактного термического сопротивления, что в дальнейшем отразится на результатах расчета теплового и прочностного состояния всего аппарата.

### 6.7 Влияние модуля упругости материалов на контактный теплообмен

На рисунке 6.21, приведенном ниже, представлены распределения КТС, полученные из более чем 2500 численных расчётов, в зависимости от эквивалентной теплопроводности  $\lambda_{eq}$  в Вт/(м·К), модулей Юнга материалов более нагретой  $E_1$  и менее нагретой  $E_2$  поверхностей в ГПа и от прижимающего давления  $P$  в МПа. Из рисунка можно видеть, что функция  $R_k(P)$  значительней всего зависит от  $\lambda_{eq}$  и в меньшей степени от  $E_1$  и  $E_2$ . Также можно отметить, что

при низких значениях  $E_1$  функция  $R_K(P)$  слабее зависит от  $E_2$ , чем при высоких  $E_1$ .



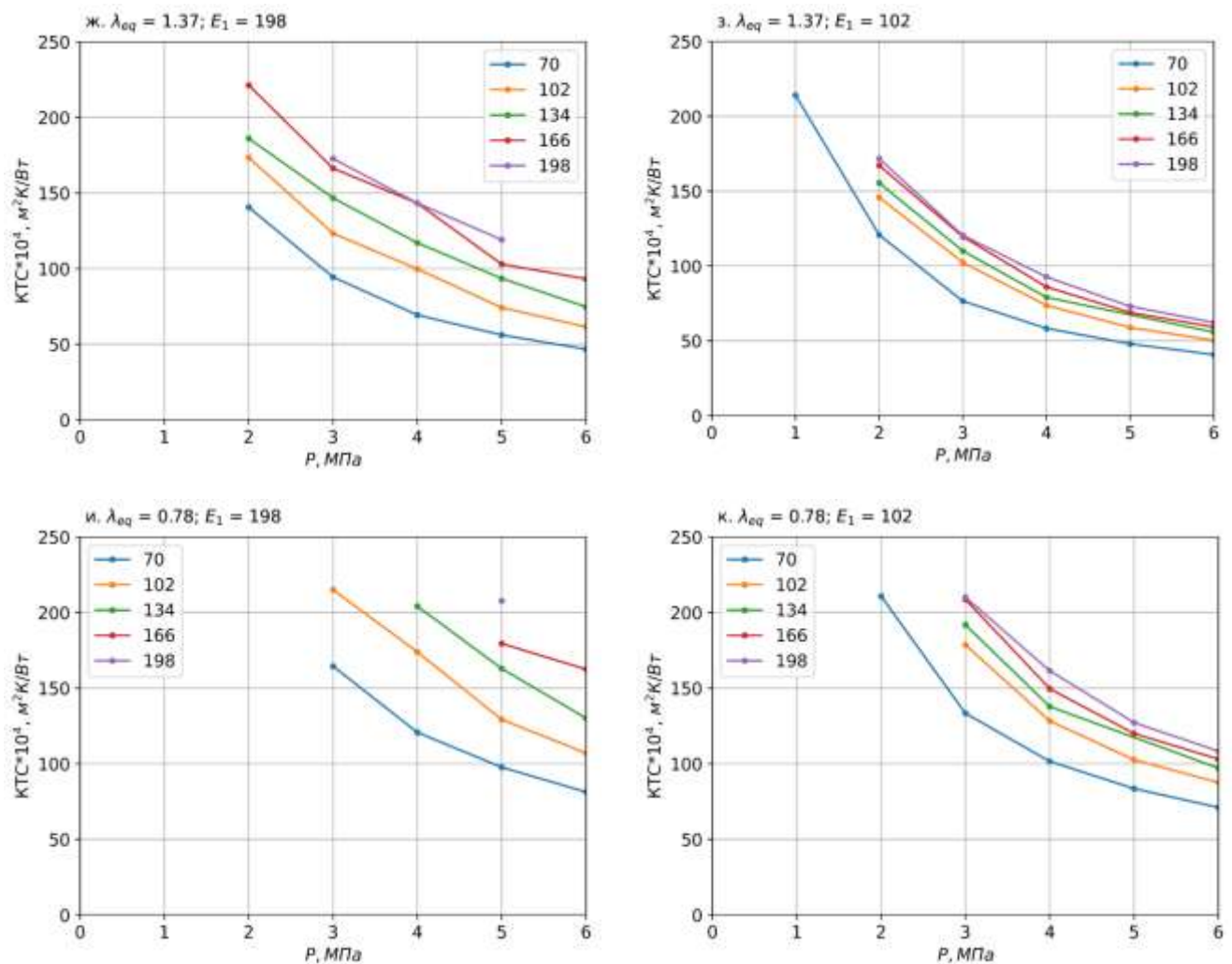


Рис. 6.21. Зависимость КТС от  $P$ ,  $\lambda_{eq}$  и  $E_1$  (см. подписи), а также  $E_2$  (см. легенду).

Из рисунков можно видеть, что функция  $R_k(P)$  значительней всего зависит от  $\lambda_{eq}$  и в меньшей степени от  $E_1$  и  $E_2$ . Также можно отметить, что при низких значениях  $E_1$  функция  $R_k(P)$  слабее зависит от  $E_2$ , чем при высоких  $E_1$ .

## 6.8 Влияние межконтактной среды.

Как отмечалось ранее КТС состоит из сопротивления среды и сопротивления мест фактического контакта. Рассмотрим первую составляющую термического сопротивления. Величина  $R_c$  является внешним сопротивлением и определяется теплопроводностью среды и толщиной зазора. Это поверхностное

сопротивление происходит в плоскости геометрического контакта и приводит к скачкообразному изменению температуры на границе двух тел.

Итак, рассмотрим контакт двух шероховатых тел в увеличенном масштабе (рис. 6.22). Если площадь фактического контакта пренебрежимо мала (поверхности не сжимаются), то тепловой поток сможет переходить от тела 1 к телу 2 только благодаря теплопроводности среды в зазорах.

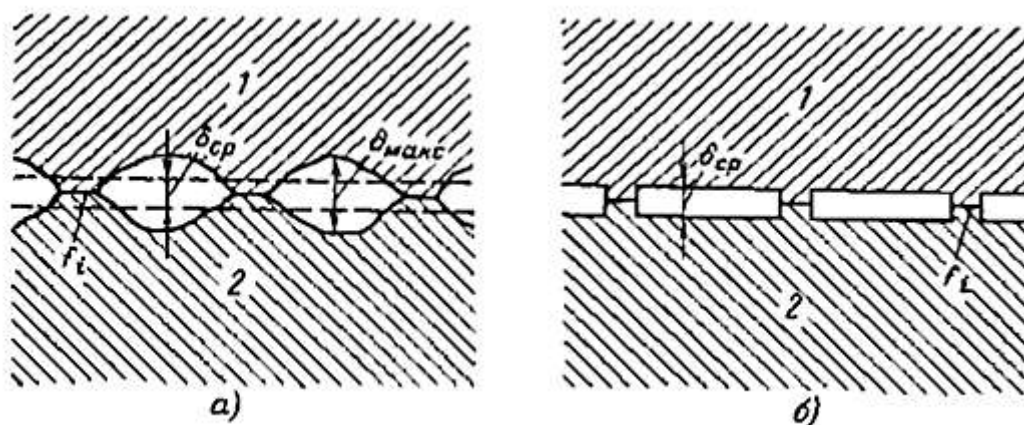


Рис. 6.22. Контакт шероховатых поверхностей: а) реальный контакт; б) схематичный контакт.

В этом случае термическое сопротивление рассчитывается следующим образом:

$$R_c = \delta / \lambda_{\text{среды}} \text{ [м}^2 \cdot \text{К/Вт]}$$

где  $\delta$  – средняя высота межконтактного зазора,  $\lambda_{\text{среды}}$  – теплопроводность среды.

На основе этого была разработана методика расчета КТС с учетом межконтактной среды при малых прижимных усилиях.

С целью создания методики определения КТС с учетом межконтактной среды при малых прижимных усилиях нужно выполнить съем профилограмм профиля поверхности для обеих соприкасающихся поверхностей. Это можно выполнить любым прибором, но лучше всего использовать современные профилометры, например профилометр Mitutoyo Surftest SJ-210 (рис. 6.23, 6.24), которым часто оснащены современные предприятия двигателестроения.

По результатам измерения шероховатости образцов из 12X18H10T и КМК-МС получены профилограммы поверхностей с  $Ra = 0,82$  мкм и  $Ra = 2,07$  мкм соответственно.

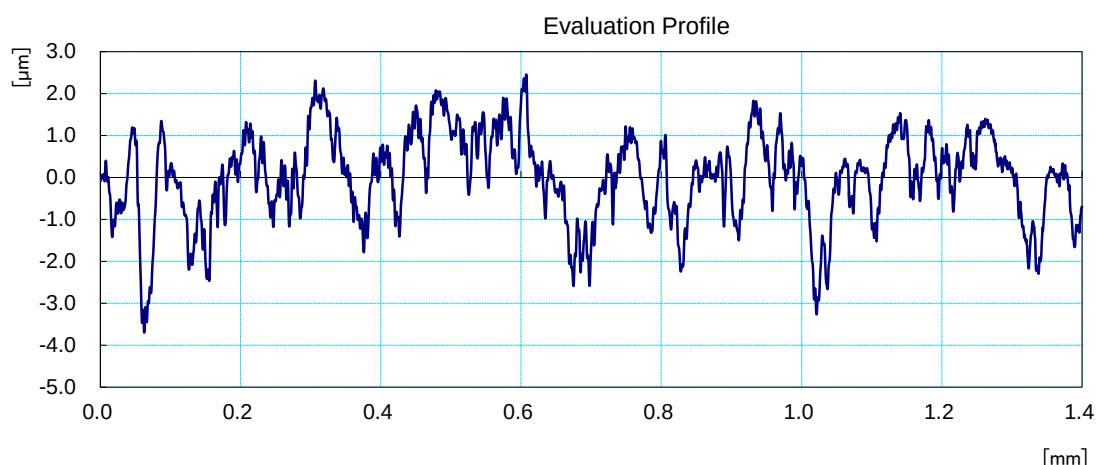


Рис. 6.23. Шероховатость поверхности 12X18H10T с  $Ra = 0,82$  мкм

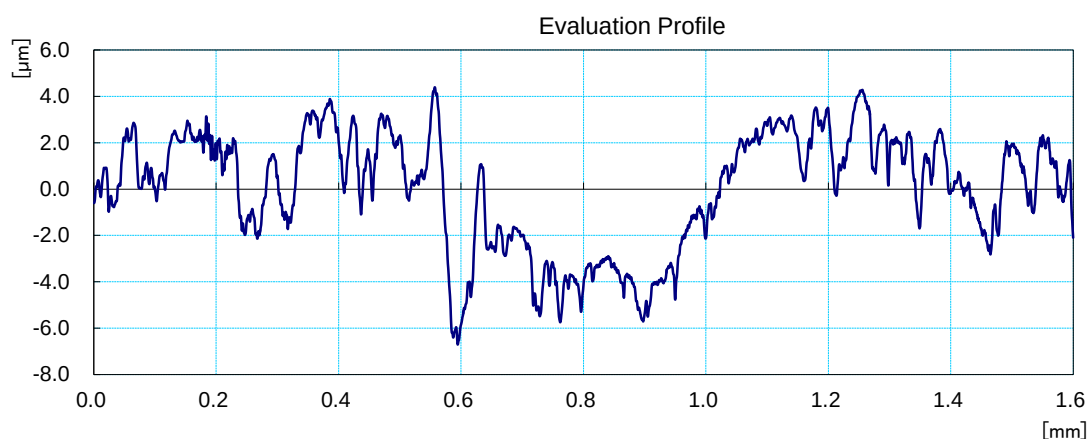


Рис. 6.24. Шероховатость поверхности КМК-МС с  $Ra = 2,07$  мкм

При снятии профилограмм поверхностей профилометром были получены значения точек микрорельефа с шагом по оси абсцисс 0.0005 мм, что на базовой длине 1,4 мм для 12X18H10T и 1,6 мм для КМК-МС позволило получить 2800 точек и 3200 точек со своими значениями высот соответственно.

Далее для определения КТС вычисляется средняя высота межконтактного зазора по формуле:

$$h_{cp} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N h$$

Для расчета высоты зазора обрабатываем результаты профилограмм поверхностей следующим образом (см. рис. 6.25).

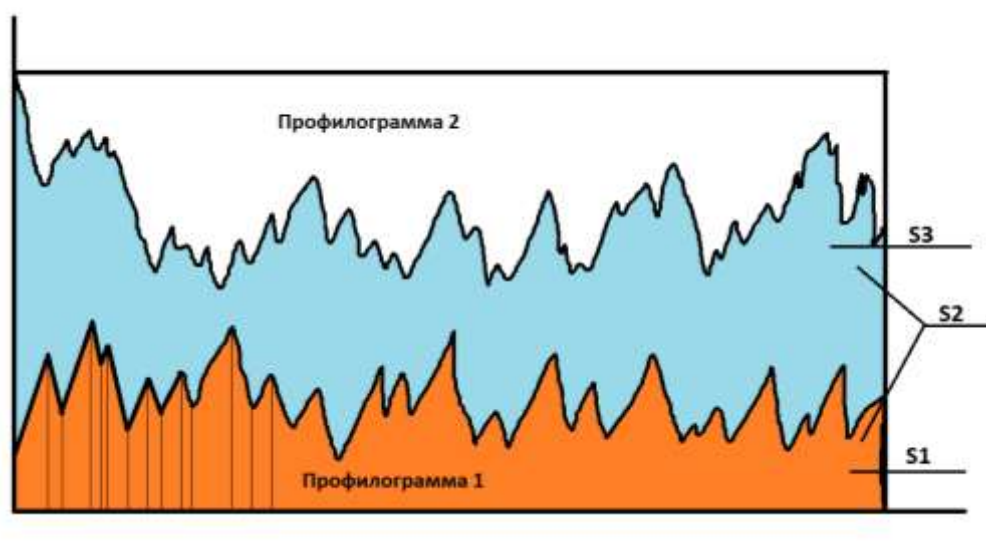


Рис. 6.25. Схематическое контактирование поверхностей.

Необходимо найти площадь под первой профилограммой S1. Для этого данные первой профилограммы нужно обработать следующим образом:

1. Столбец со значением высот нужно отсортировать в порядке убывания (см. рис. 6.26);

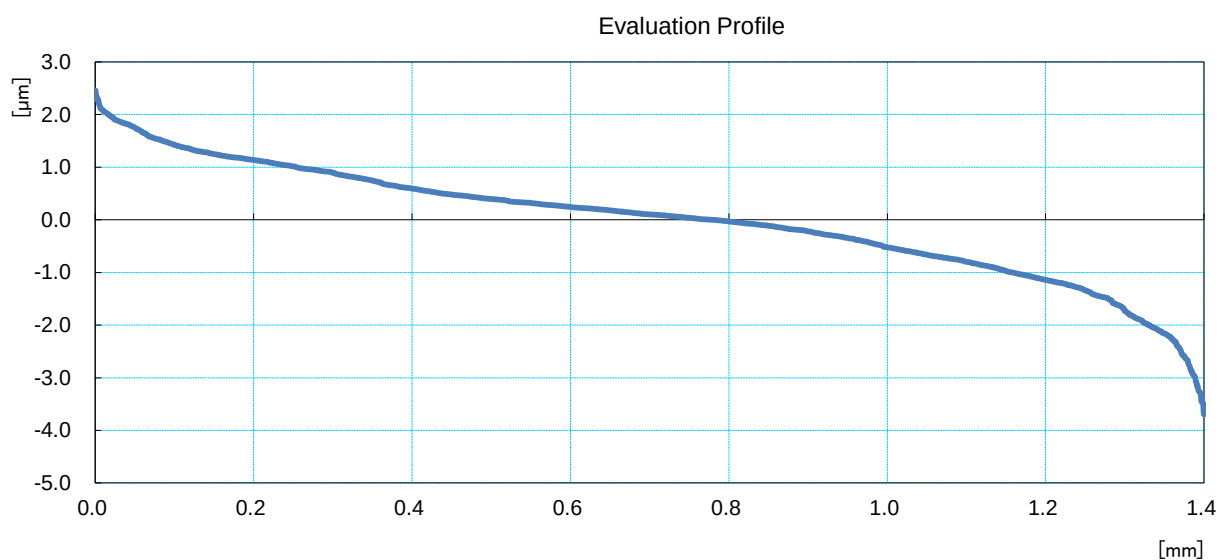


Рис. 6.26. Результат сортировки



2. Добавить ко всем значениям высот последнее значение высоты профилограммы (см. рис. 6.27);

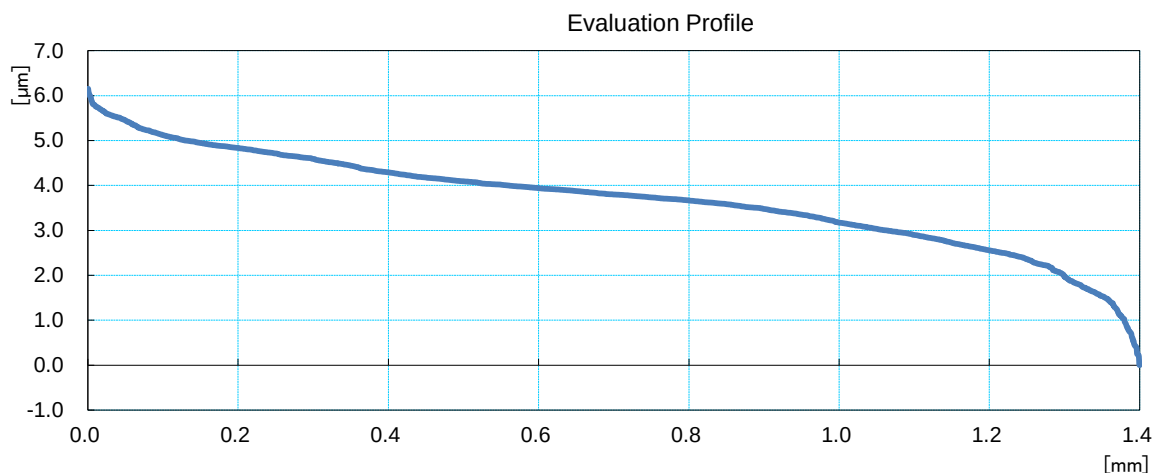


Рис. 6.27. Результат преобразования

3. Найти площадь каждой трапеции под графиком;
4. Путем сложения всех площадей трапеций получим площадь под первым графиком S1.

Далее обрабатываем вторую профилограмму аналогично пунктам 1 и 2 (рис. 6.28, 6.29). После этого переворачиваем значения высот относительно горизонтальной линии, проходящей через первую точку, и поднимаем все значения второй профилограммы на высоту начала первой профилограммы (рис. 6.30).



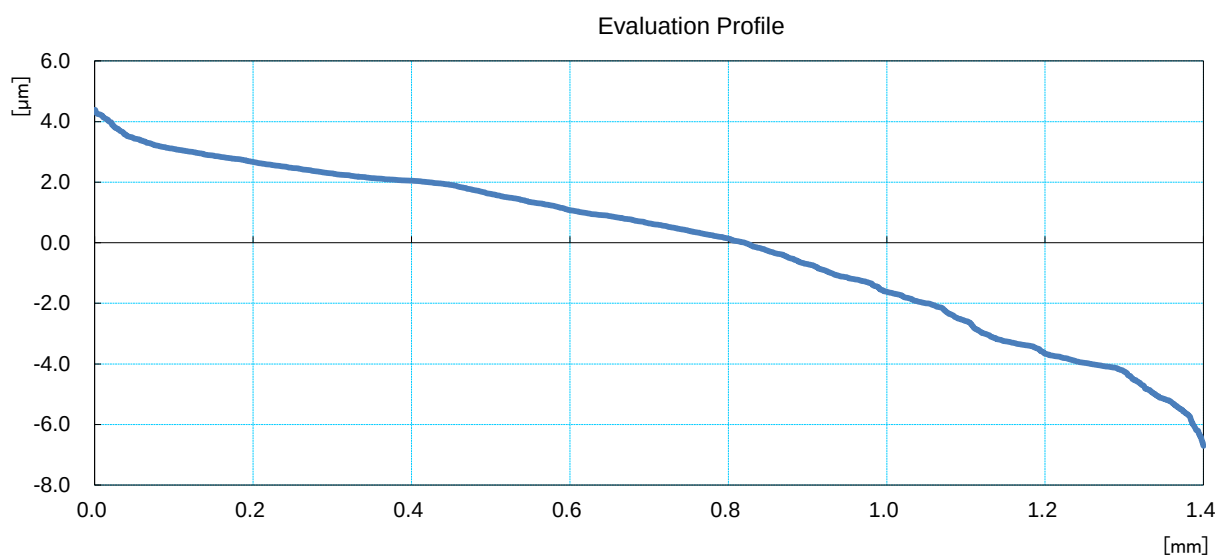


Рис. 6.28. Результат сортировки

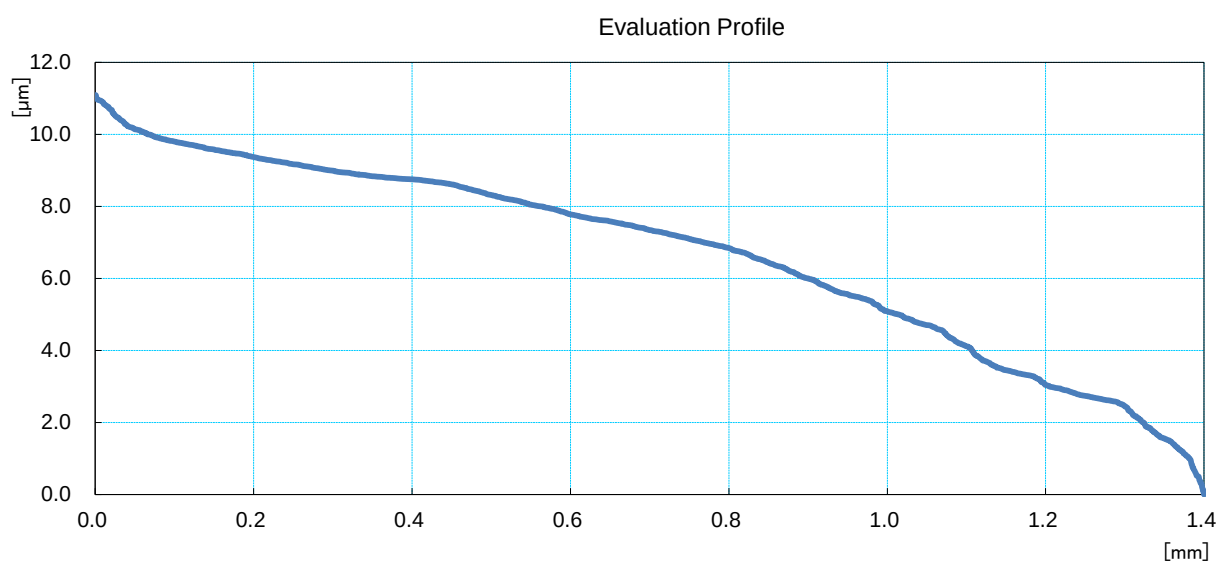


Рис. 6.29. Результат преобразования

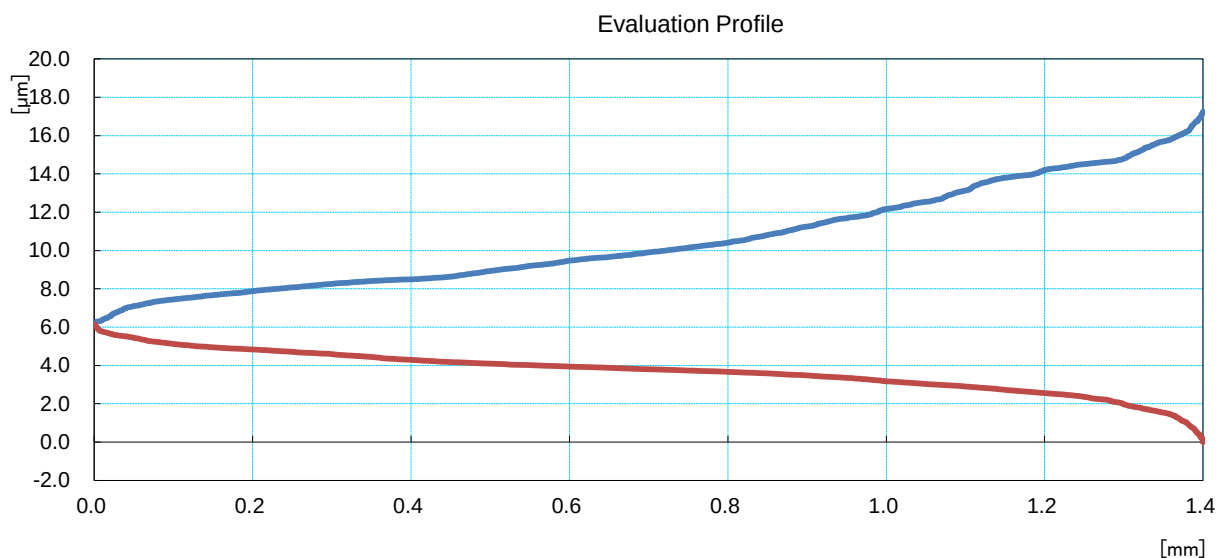


Рис. 6.30. Модель контактирования

Аналогично пунктам 3 и 4 находим площадь под второй профилограммой S2.

Вычитаем из S2 S1 и получаем площадь зазора между поверхностями S3.

Чтобы получить среднюю высоту межконтактного зазора необходимо площадь S3 поделить на базовую длину. И для нахождения КТС нужно полученную среднюю высоту зазора разделить на теплопроводность среды. Для автоматизации процесса расчета КТС с учетом межконтактной среды при малых прижимных усилиях была создана программа на языке Fortran, текст программы представлен в Приложении 1.

Для начала расчета программе необходим файл с профилограммой для каждой поверхности (всего два файла). Прежде всего нужно обработать данные снятые профилометром, а именно скопировать столбцы E и F профилограммы первой поверхности в файл «Inlet.dat» предварительно заменив все запятые на точки (Fortran не считывает запятые). Аналогично скопировать данные профилограммы второй поверхности в файл «inlet2.dat».

При запуске программа потребует ввести количество точек со своими значениями высот и теплопроводность среды (рис. 6.31).

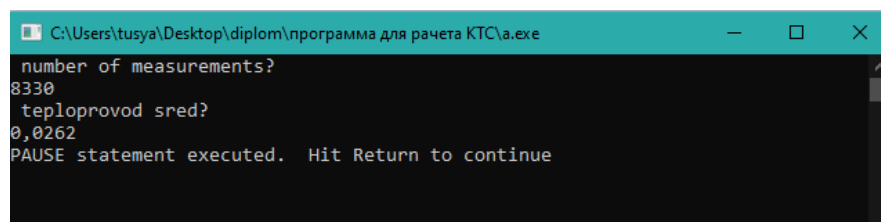


Рис. 6.31. Окно программы для расчета КТС.

В итоге программа создает три файла вывода «outlet1.dat» (см. рис. 6.32), «outlet2.dat» (см. рис. 6.33) и «outlet3.dat» (см. рис. 6.34). В первых двух файлах промежуточные значения для первой и второй профилограмм соответственно. В третьем площади  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и КТС.

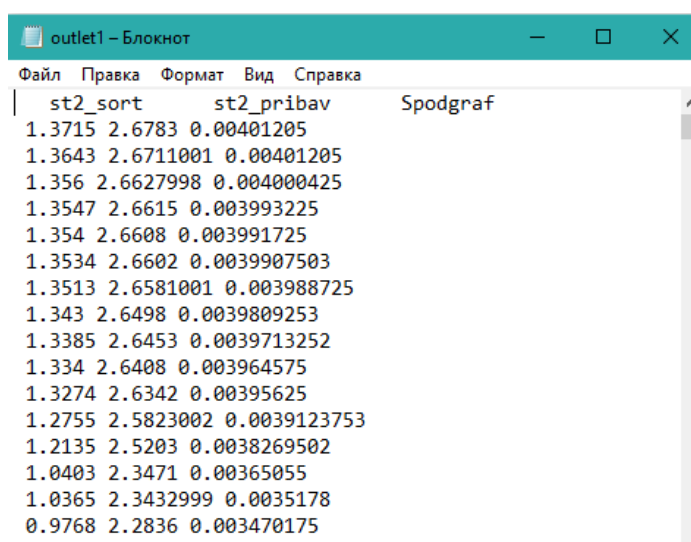


Рис. 6.32. Файл outlet1.dat

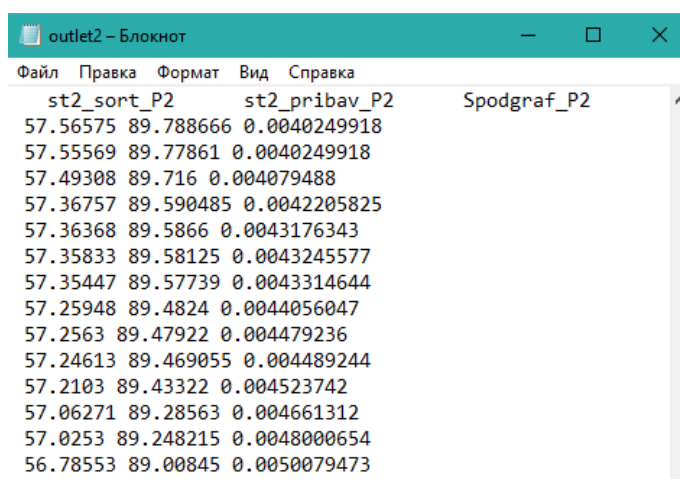


Рис. 6.33. Файл outlet2.dat

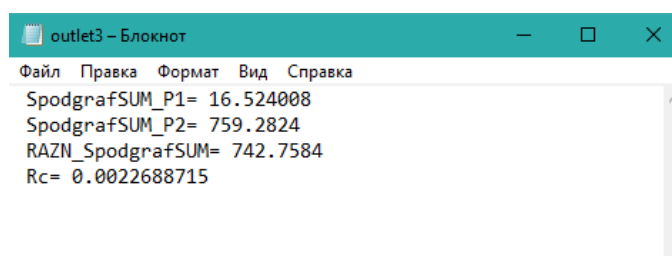


Рис. 6.34. Файл outlet3.dat

В таблице 1 приведены результаты расчета КТС при малых прижимных усилиях в паре материалов 12X18H10T–12X18H10T с шероховатостью  $Ra = 0,82$  мкм.

Таблица 6.3. Результаты расчёта с учётом межконтактной среды для материалов 12X18H10T–12X18H10T

| Т, °С | Теплопроводность<br>среды, Вт/м*К | КТС,<br>м <sup>2</sup> ·К/Вт |
|-------|-----------------------------------|------------------------------|
| Азот  |                                   |                              |
| 200   | 0.0358                            | 0.00013719837                |
| 300   | 0.0417                            | 0.0001177866                 |
| 400   | 0.0472                            | 0.000104061466               |
| 500   | 0.0524                            | 0.00009373476                |
| 600   | 0.0572                            | 0.00008586891                |
| 700   | 0.0622                            | 0.000078966266               |
| 800   | 0.0685                            | 0.000071703675               |
| Аргон |                                   |                              |
| 200   | 0.0257                            | 0.0001911168                 |
| 300   | 0.0299                            | 0.00016427095                |
| 400   | 0.0324                            | 0.00015159573                |
| 500   | 0.0358                            | 0.00013719837                |
| 600   | 0.0391                            | 0.00012561897                |
| 700   | 0.0422                            | 0.000116391035               |

|                  |        |                |
|------------------|--------|----------------|
| 800              | 0.0450 | 0.00010914892  |
| Воздух           |        |                |
| 200              | 0.0393 | 0.00012497969  |
| 300              | 0.046  | 0.00010677612  |
| 400              | 0.0521 | 0.0000942745   |
| 500              | 0.0574 | 0.000085569714 |
| 600              | 0.0622 | 0.000078966266 |
| 700              | 0.0671 | 0.00007319972  |
| 800              | 0.0718 | 0.000068408095 |
| Эпоксидная смола |        |                |
| 30               | 0,59   | 0.000008324918 |
| Термопаста КПТ-8 |        |                |
| 30               | 0,65   | 0.000007556464 |

В таблице 2 приведены результаты расчета КТС при малых прижимных усилиях в паре материалов КМК-МС–12Х18Н10Т с шероховатостью  $Ra = 2,07$  мкм и  $Ra = 0,82$  мкм соответственно.

Таблица 6.4. Результаты расчёта с учётом межконтактной среды для материалов КМК-МС–12Х18Н10Т

| Т, °С | Теплопроводность среды, Вт/м*К | КТС, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ |
|-------|--------------------------------|----------------------------------------------|
| Азот  |                                |                                              |
| 200   | 0.0358                         | 0.00019614861                                |
| 300   | 0.0417                         | 0.00016839616                                |
| 400   | 0.0472                         | 0.00014877373                                |
| 500   | 0.0524                         | 0.00013400993                                |
| 600   | 0.0572                         | 0.00012276434                                |
| 700   | 0.0622                         | 0.000112895825                               |

|                  |        |                |
|------------------|--------|----------------|
| 800              | 0.0685 | 0.000102512706 |
| Аргон            |        |                |
| 200              | 0.0257 | 0.00027323427  |
| 300              | 0.0299 | 0.00023485352  |
| 400              | 0.0324 | 0.0002167321   |
| 500              | 0.0358 | 0.00019614861  |
| 600              | 0.0391 | 0.00017959387  |
| 700              | 0.0422 | 0.00016640096  |
| 800              | 0.0450 | 0.00015604711  |
| Воздух           |        |                |
| 200              | 0.0393 | 0.00017867991  |
| 300              | 0.046  | 0.00015265479  |
| 400              | 0.0521 | 0.00013478159  |
| 500              | 0.0574 | 0.0001223366   |
| 600              | 0.0622 | 0.000112895825 |
| 700              | 0.0671 | 0.00010465156  |
| 800              | 0.0718 | 0.000097801116 |
| Эпоксидная смола |        |                |
| 30               | 0,59   | 0.0000119019   |
| Термопаста КИТ-8 |        |                |
| 30               | 0,65   | 0.000010803263 |

Для нахождения полного контактного термического сопротивления еще необходимо знать величину КТС при сухом контакте. Для этого воспользуемся ранее разработанной методикой А.Д. Ежова для нахождения КТС при сухом контакте.

В результате получим значения для пары материалов КМК-МС–12Х18Н10Т, приведенные в таблице 6.5.

Таблица 6.5. КТС для материалов КМК-МС–12Х18Н10Т при сухом контакте

| Т, °С | КТС при сухом контакте,<br>м <sup>2</sup> ·К/Вт |
|-------|-------------------------------------------------|
| 200   | 0,0248                                          |
| 300   | 0,0146                                          |
| 400   | 0,0112                                          |
| 500   | 0,0092                                          |
| 600   | 0,0083                                          |
| 700   | 0,0081                                          |
| 800   | 0,0078                                          |

Зная значения сопротивления среды и сопротивления мест фактического контакта, можно найти общее КТС.

Расчеты КТС выполнялись для пары материалов КМК-МС–12Х18Н10Т при температурах от 200 до 800 °С и прижимных усилиях от 0 до 6 МПа, так же учитывалось излучение. Результаты представлены на рисунках 6.35 – 6.53.

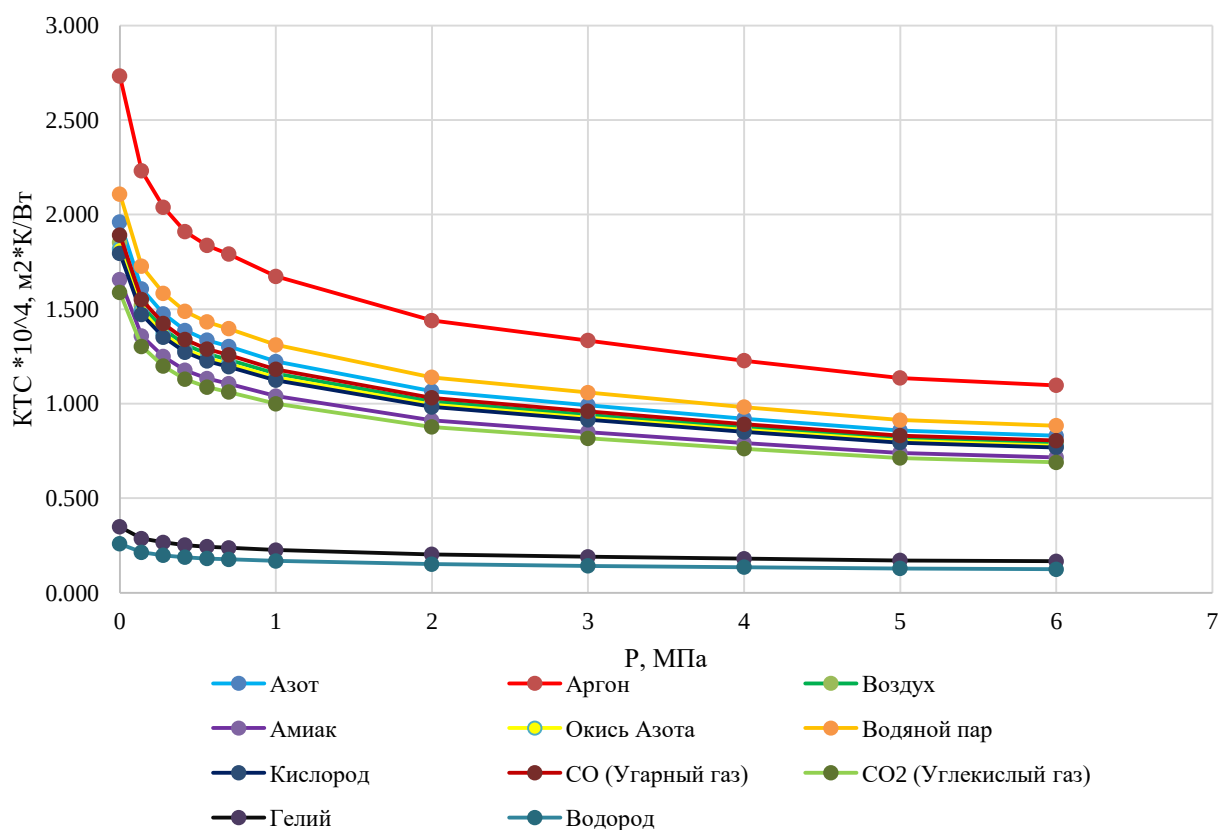


Рис. 6.35. КТС с учетом излучения при  $T = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

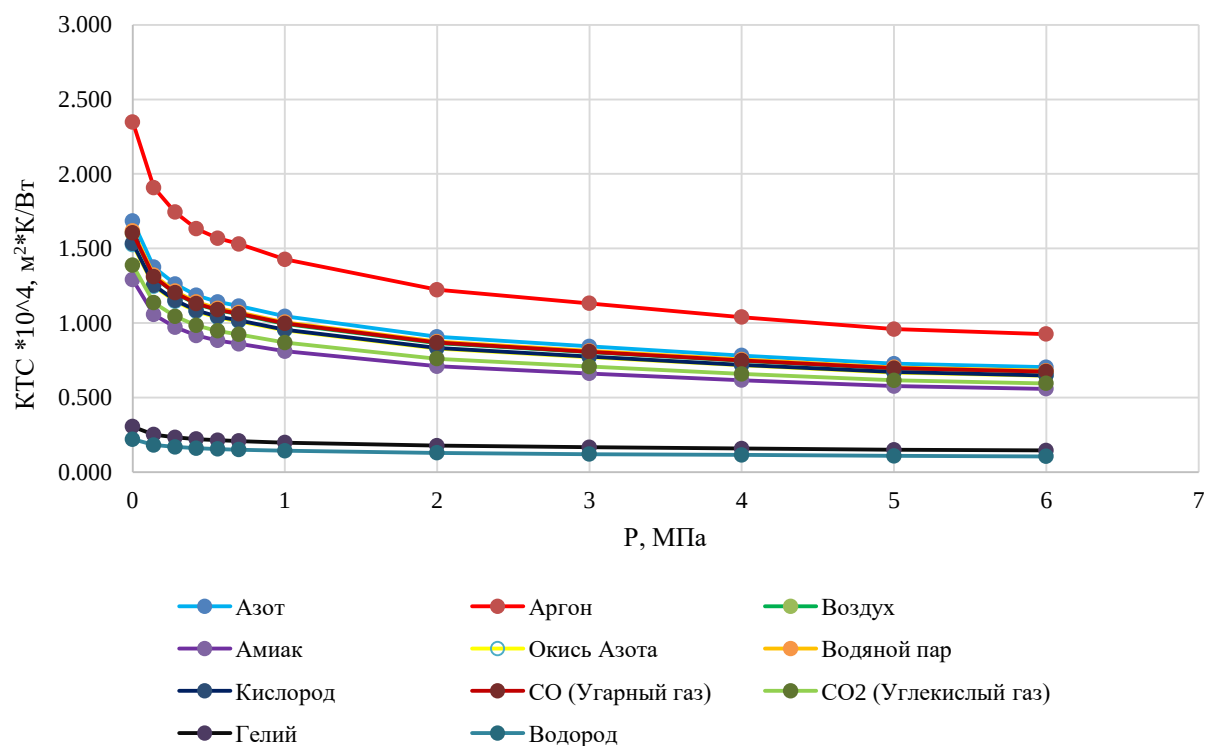


Рис. 6.36. КТС с учетом излучения при  $T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$



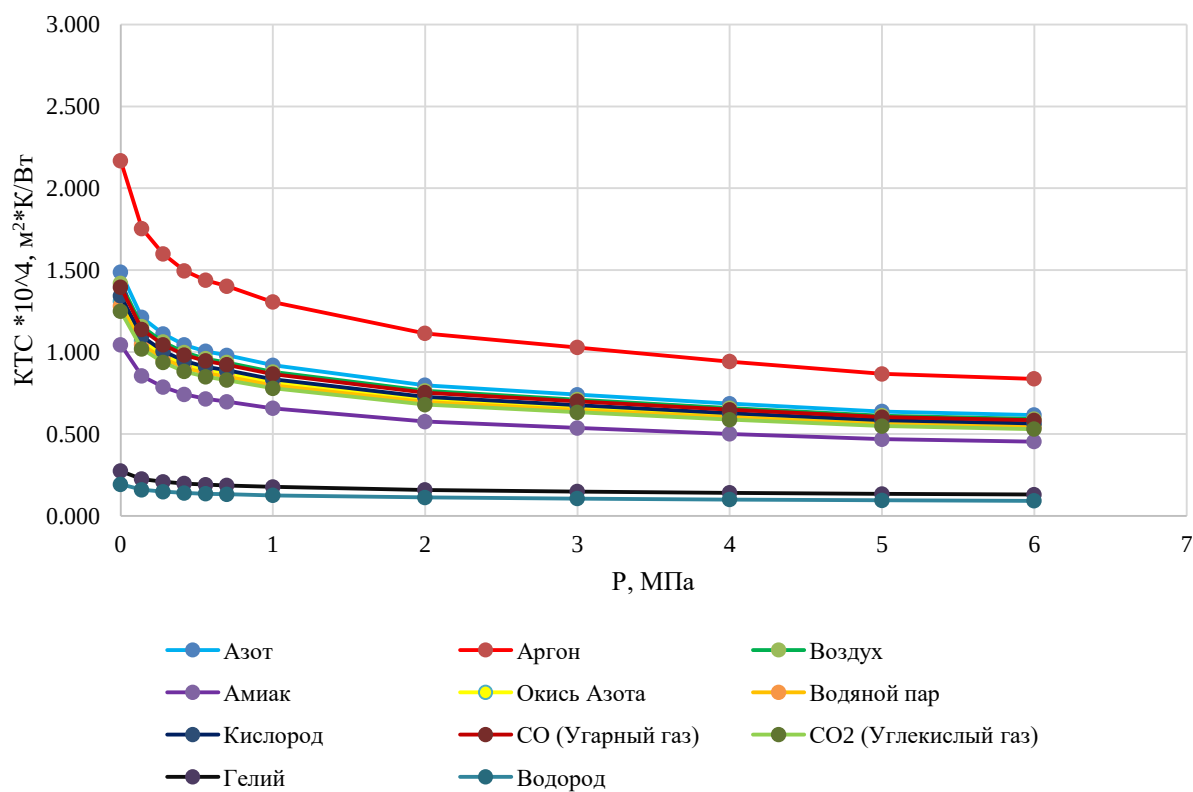


Рис. 6.37. КТС с учетом излучения при  $T = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$

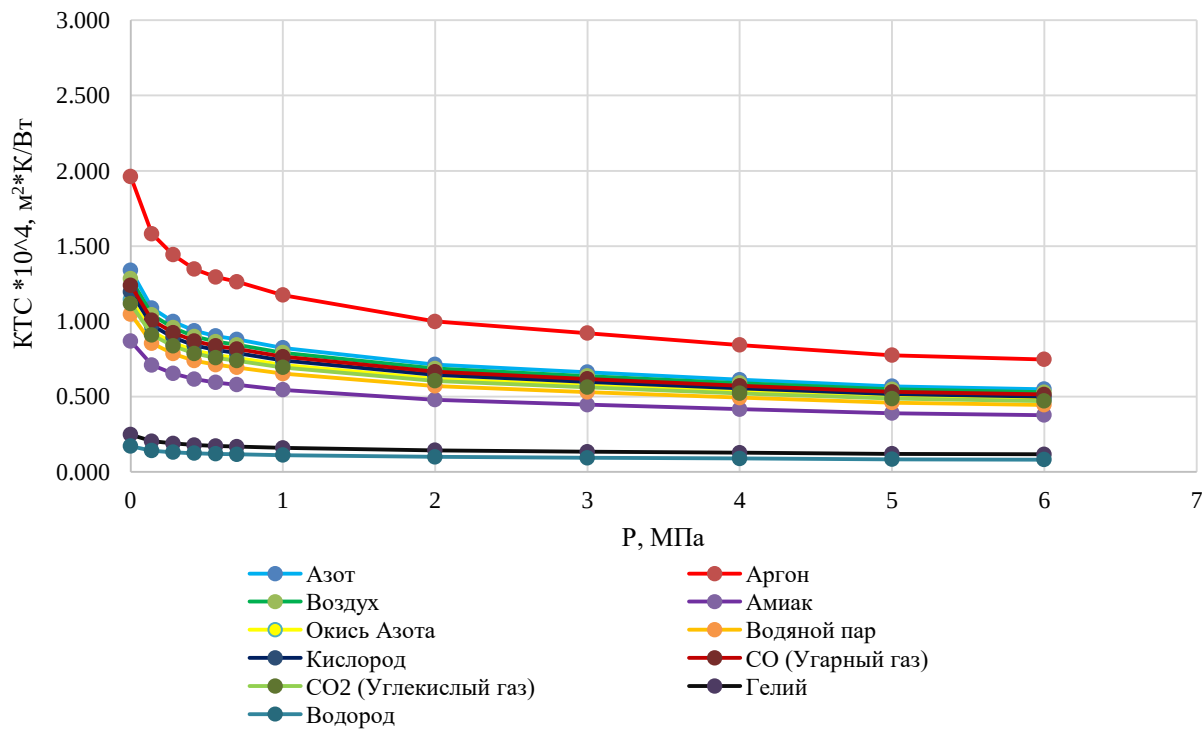


Рис. 6.38. КТС с учетом излучения при  $T = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$

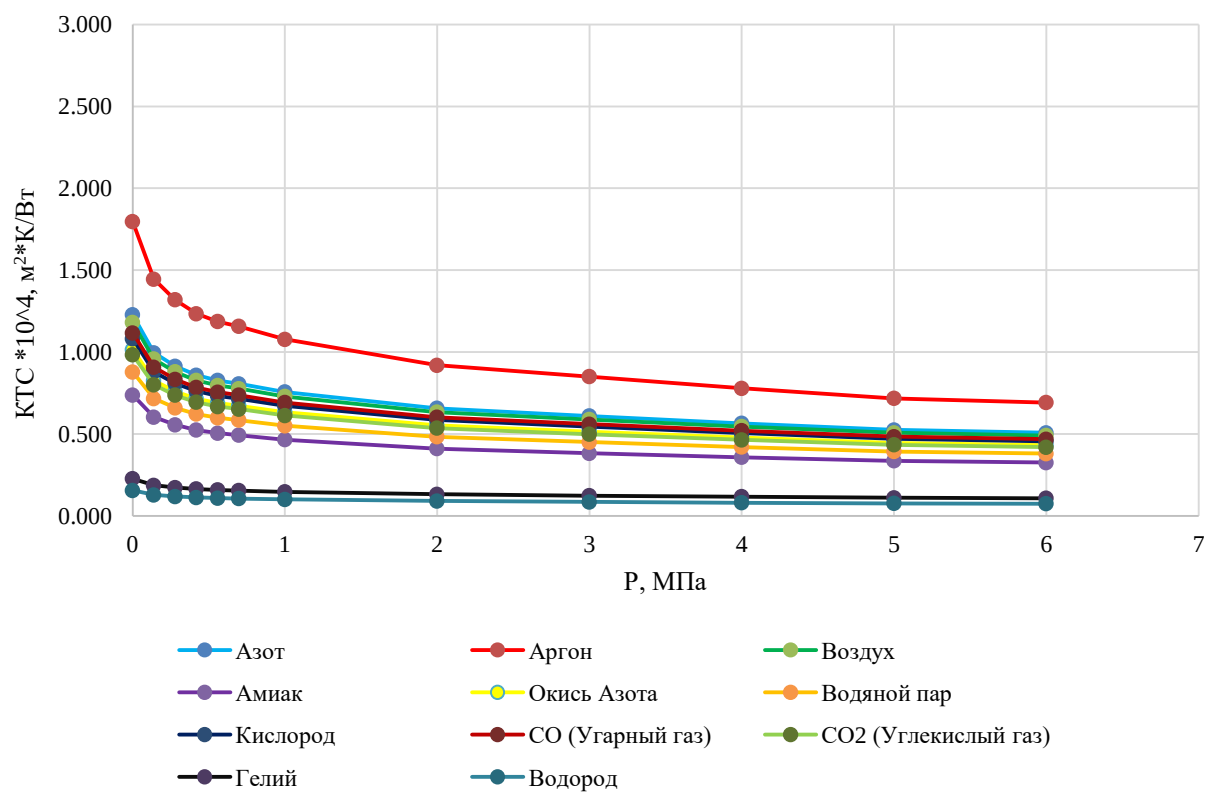


Рис. 6.39. КТС с учетом излучения при  $T = 600 \text{ }^{\circ}C$

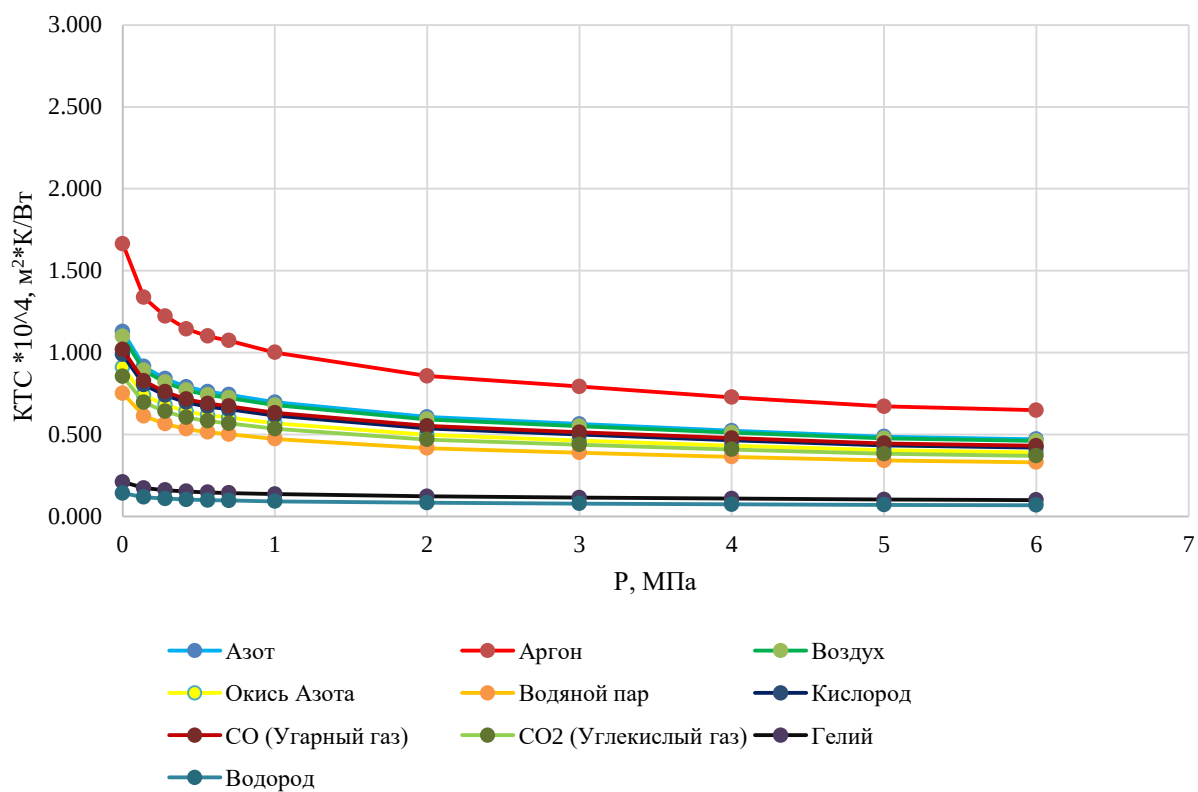


Рис. 6.40. КТС с учетом излучения при  $T = 700 \text{ }^{\circ}C$

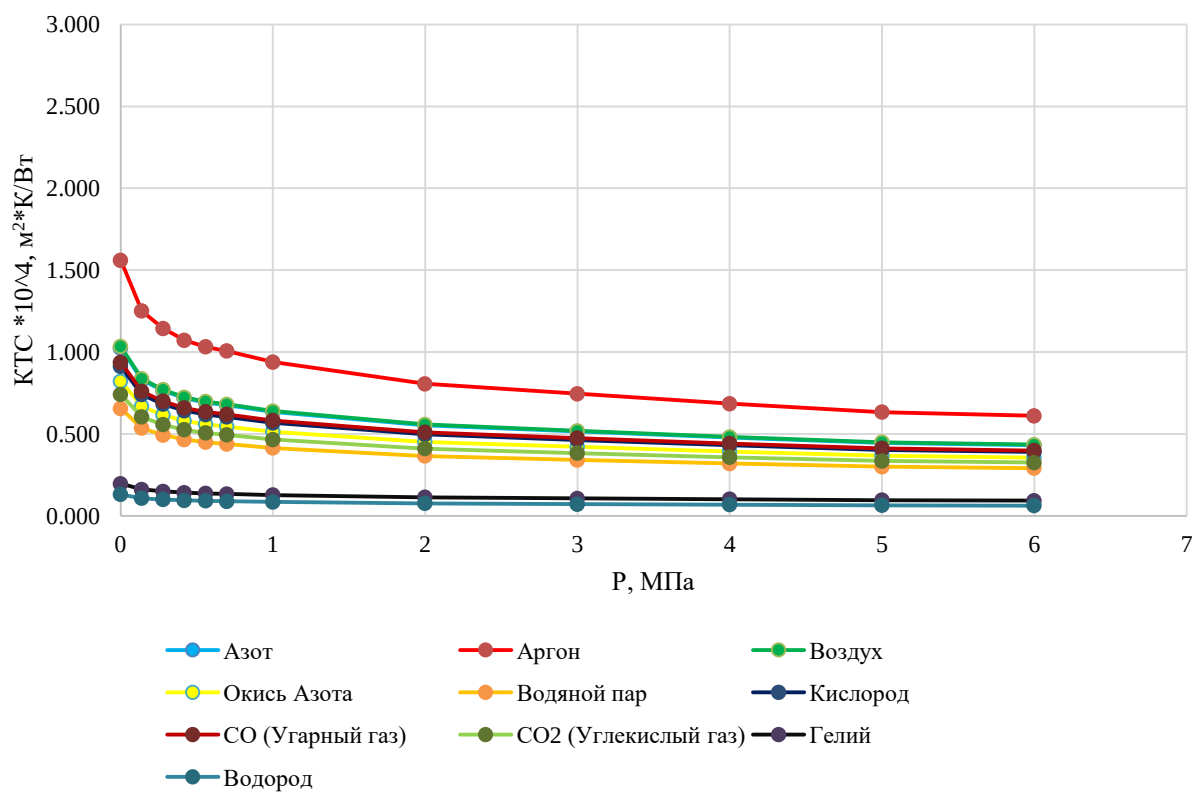


Рис.6.41. КТС с учетом излучения при  $T = 700 \text{ }^{\circ}C$

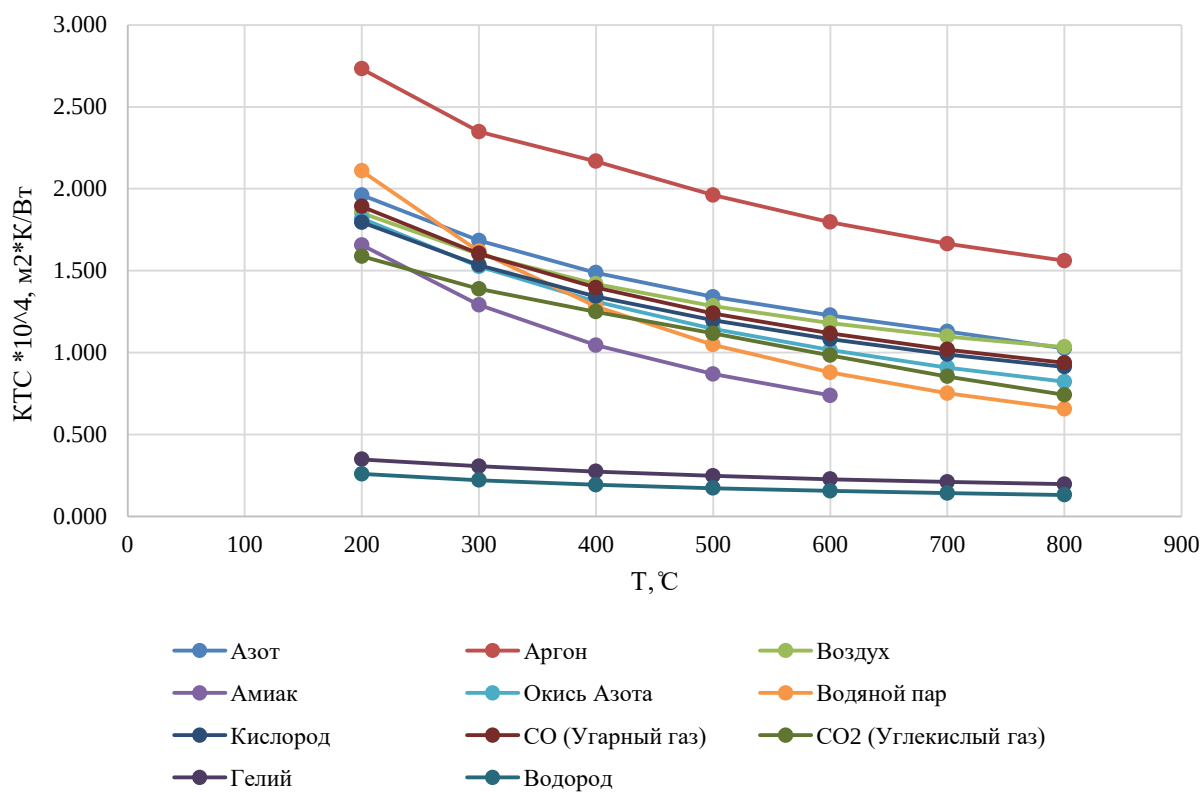


Рис. 6.42. КТС с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 0 \text{ MPa}$

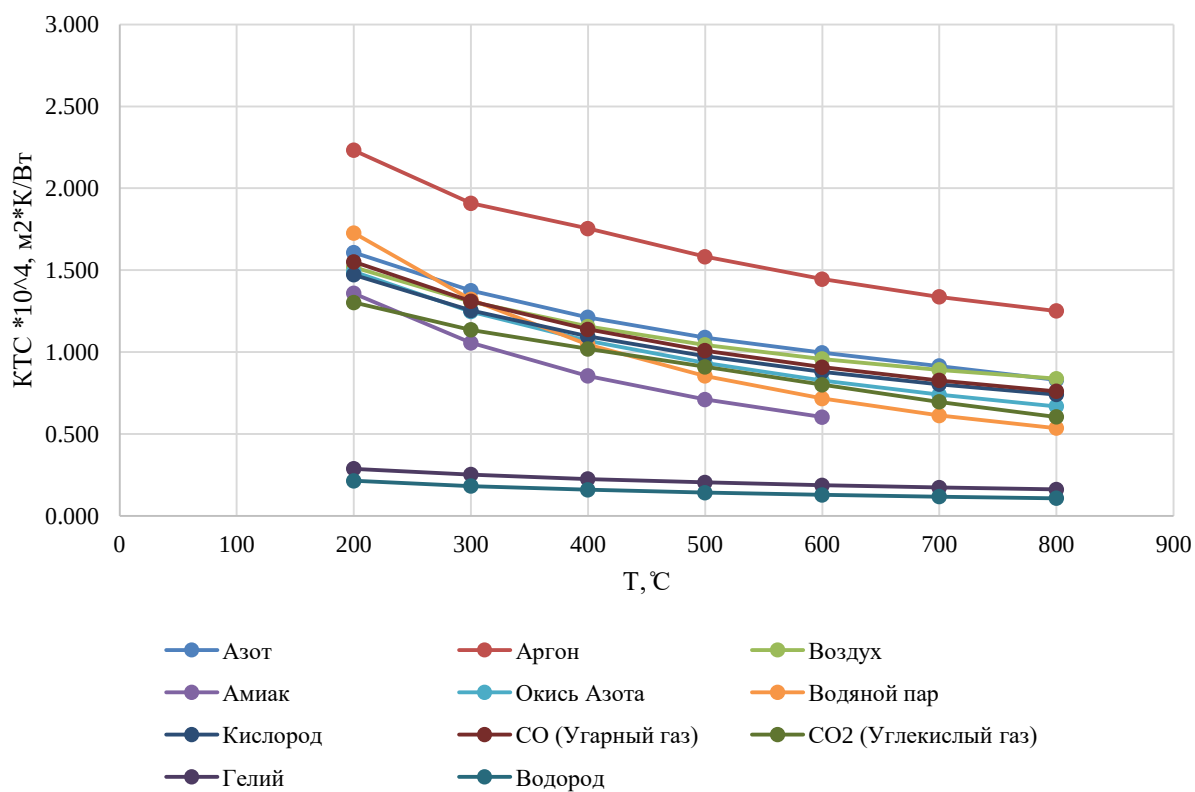


Рис. 6.43. КТС с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 0,140$  МПа

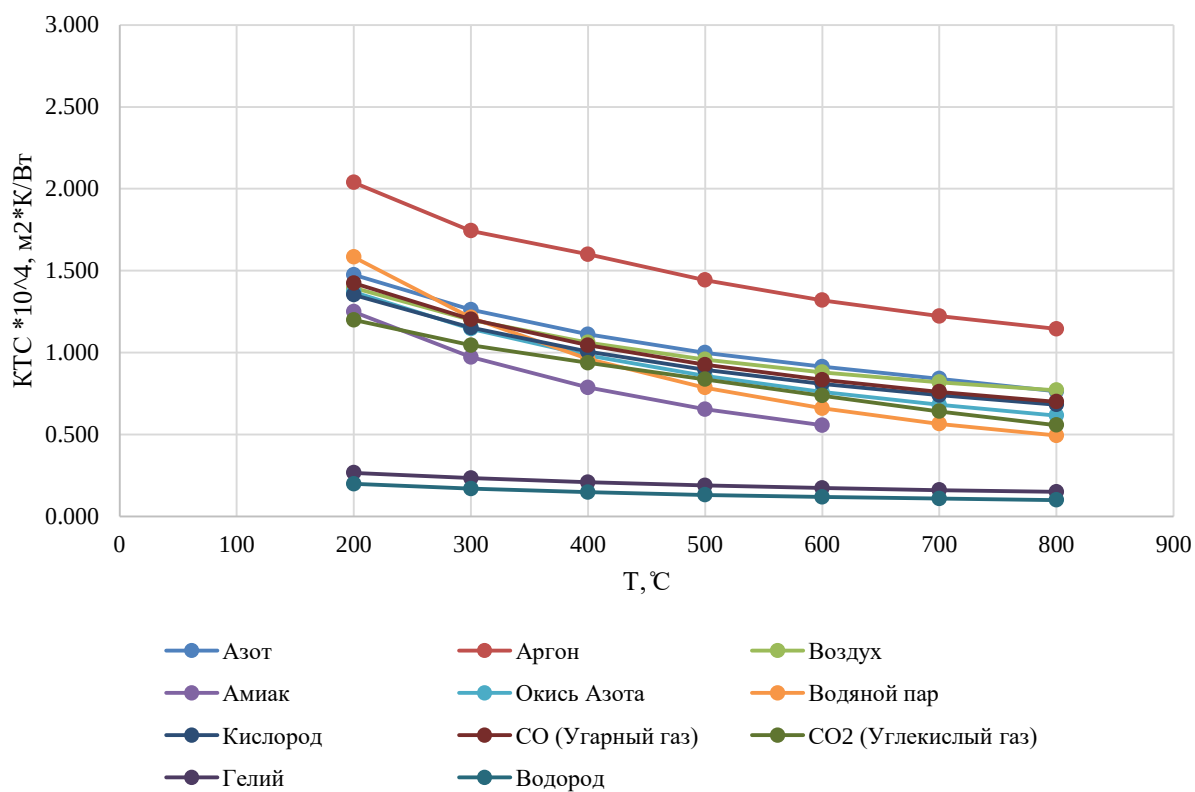


Рис. 6.44. КТС с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 0,279$  МПа

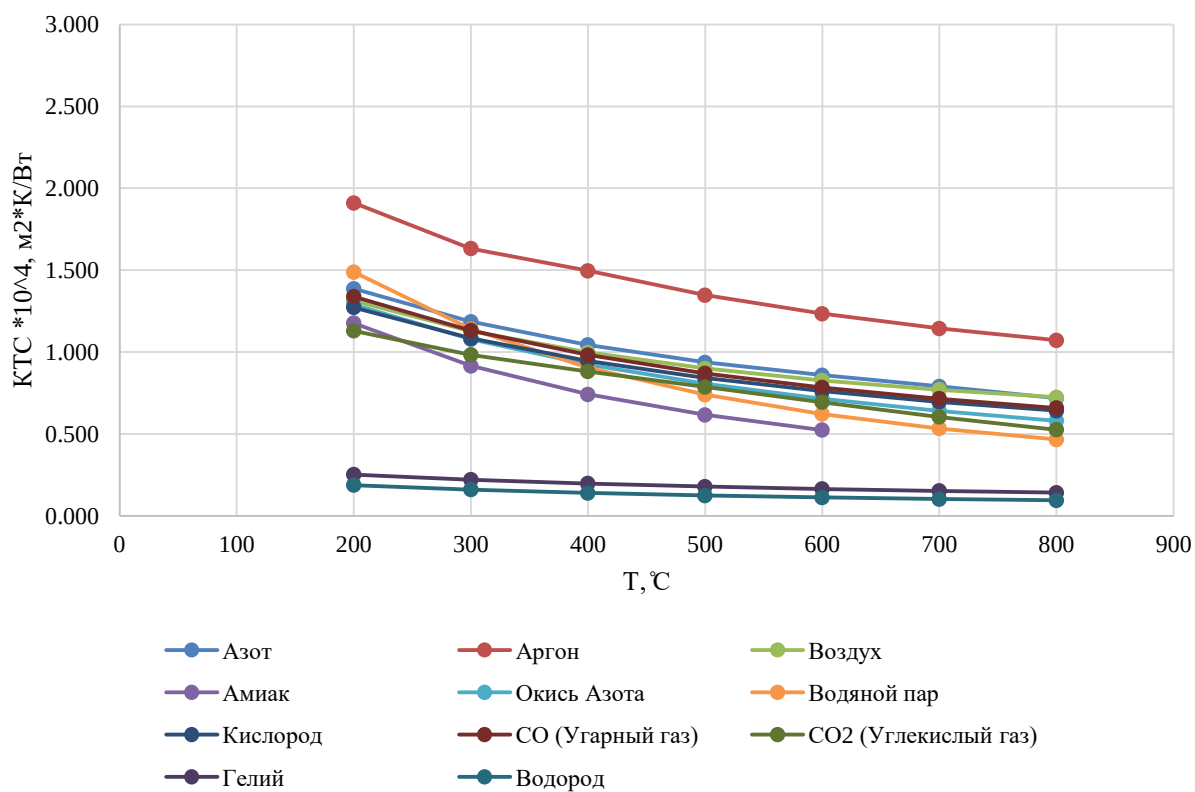


Рис. 6.45. KTC с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 0,419$  МПа

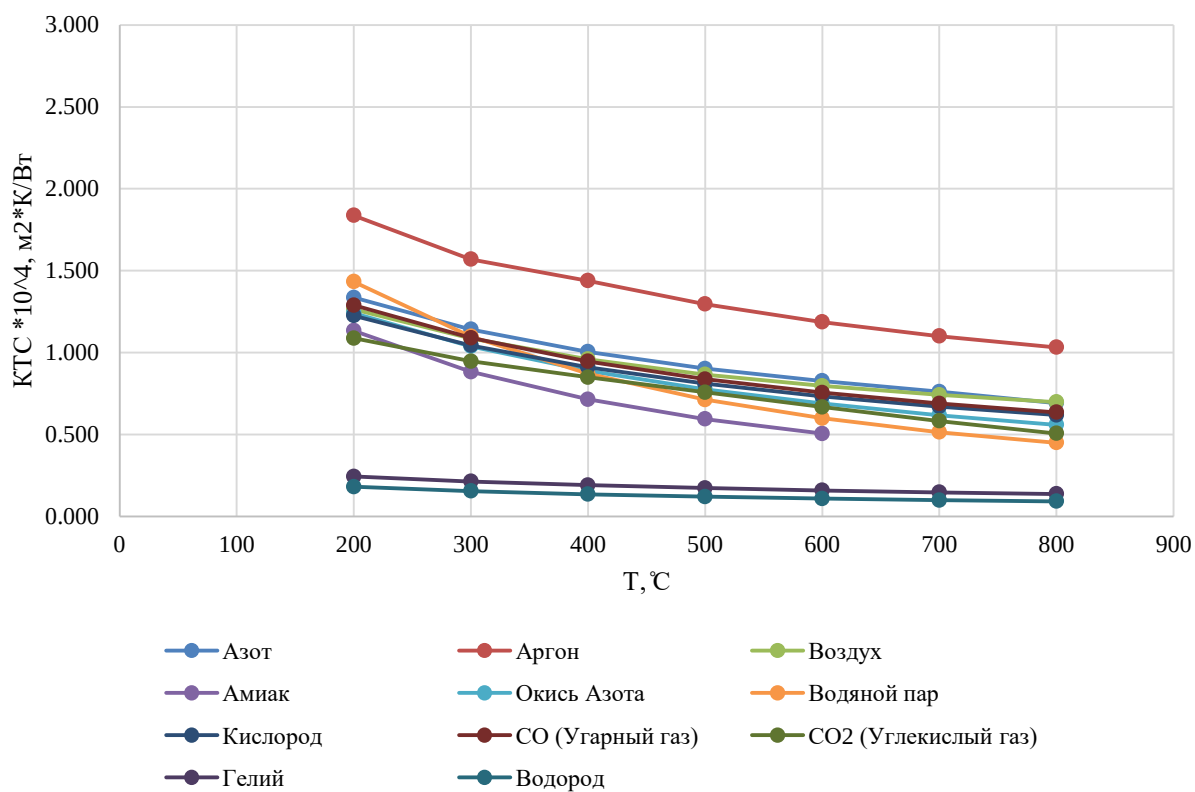


Рис. 6.46. KTC с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 0,559$  МПа

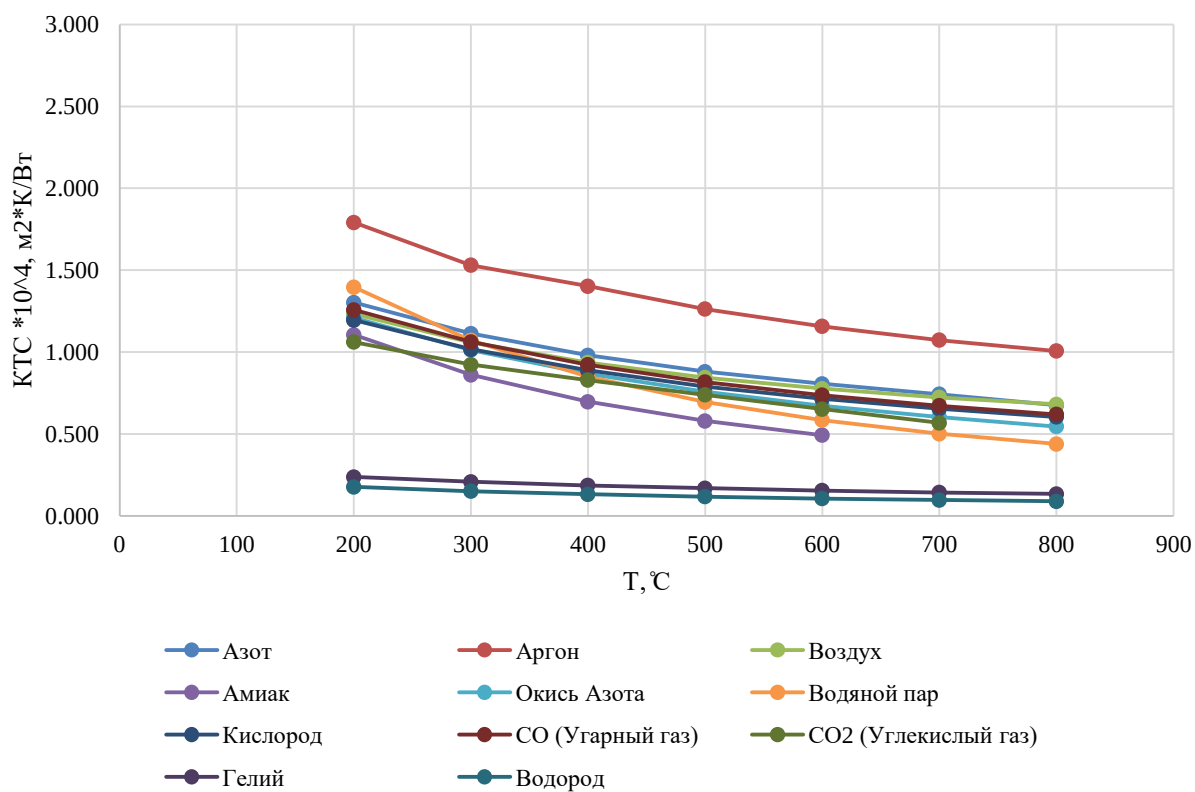


Рис. 6.47. КТС с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 0,698$  МПа

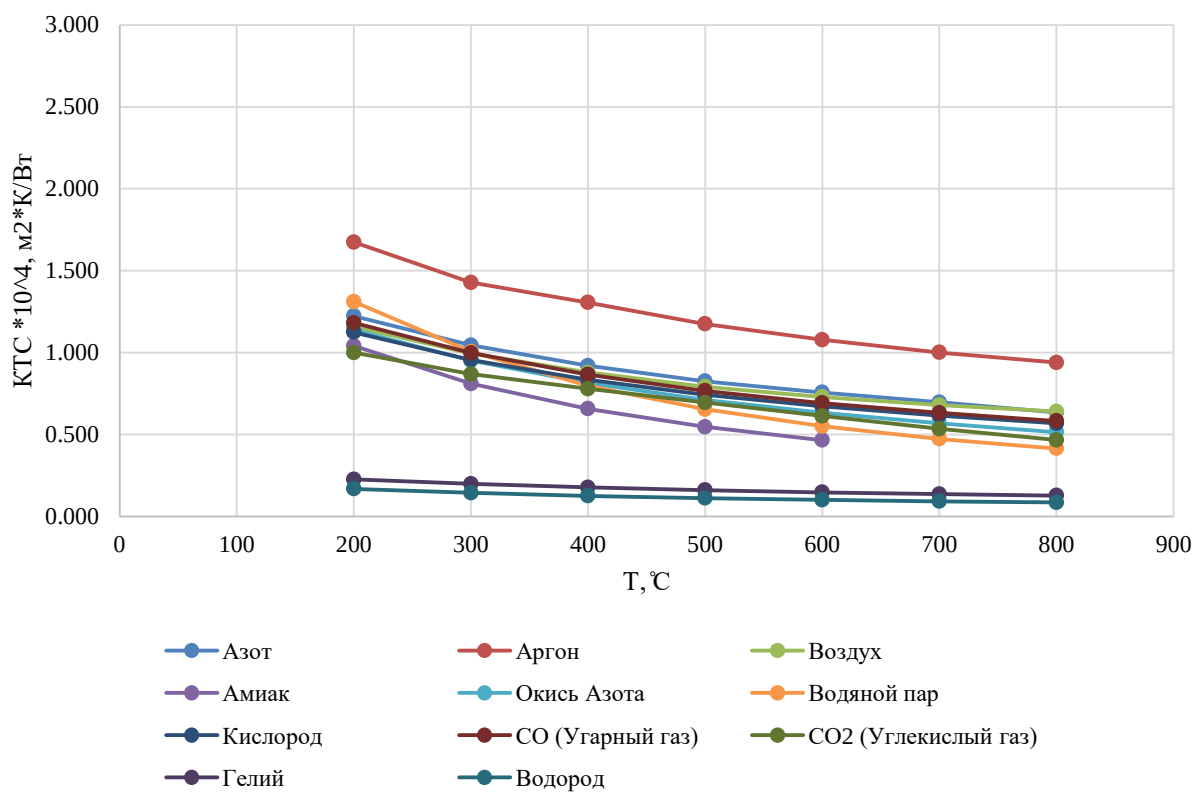


Рис. 6.48. КТС с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 1$  МПа

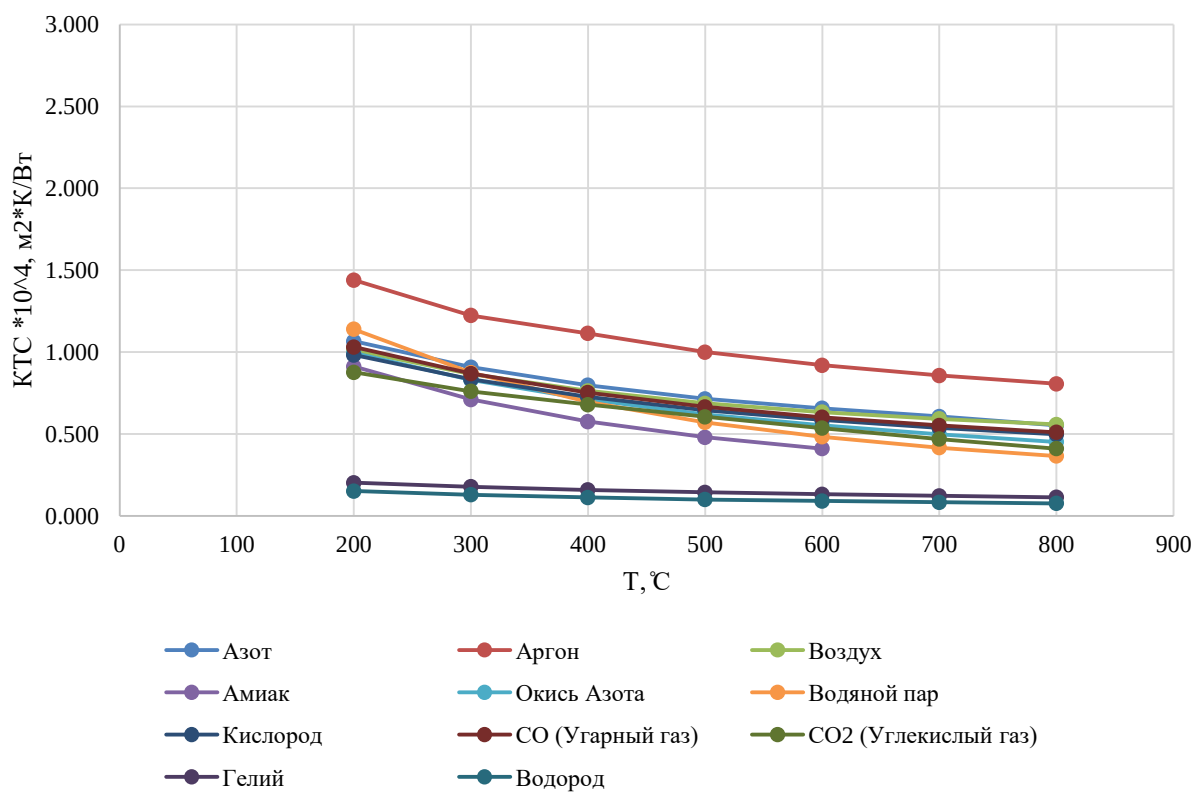


Рис. 6.49. КТС с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 2$  МПа

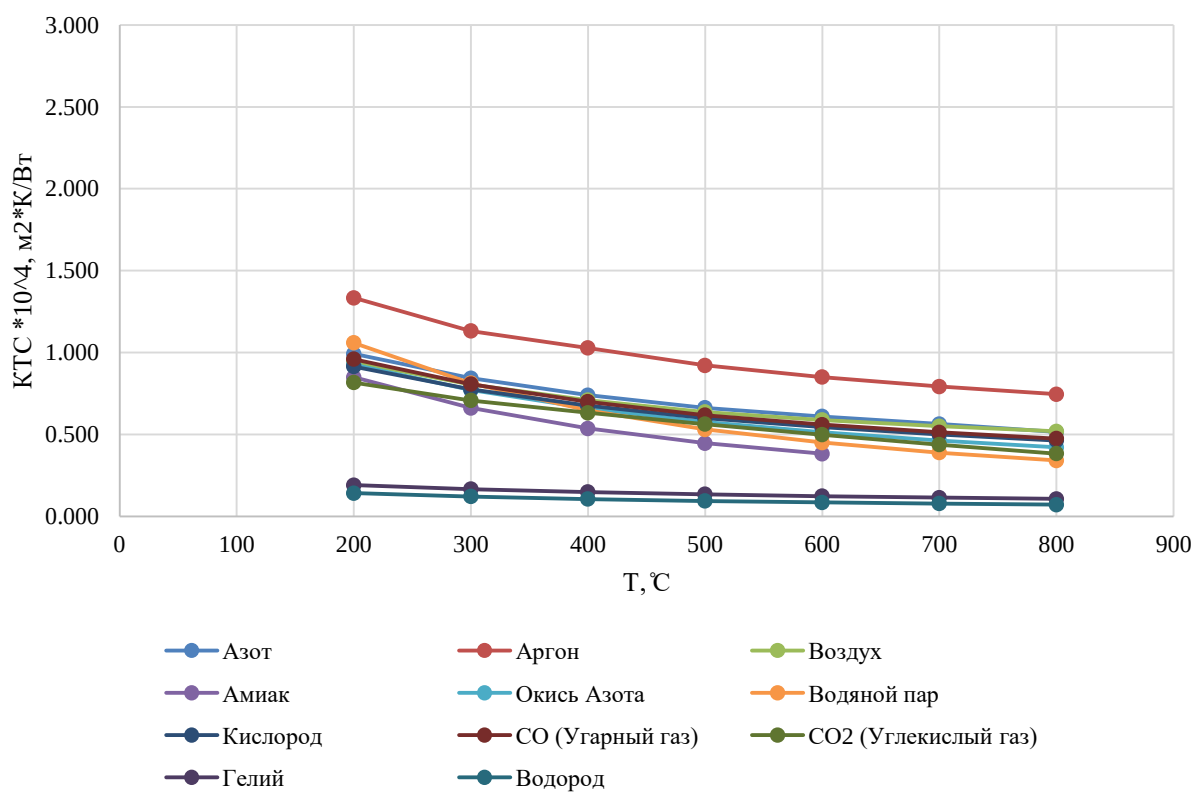


Рис. 6.50. КТС с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 3$  МПа

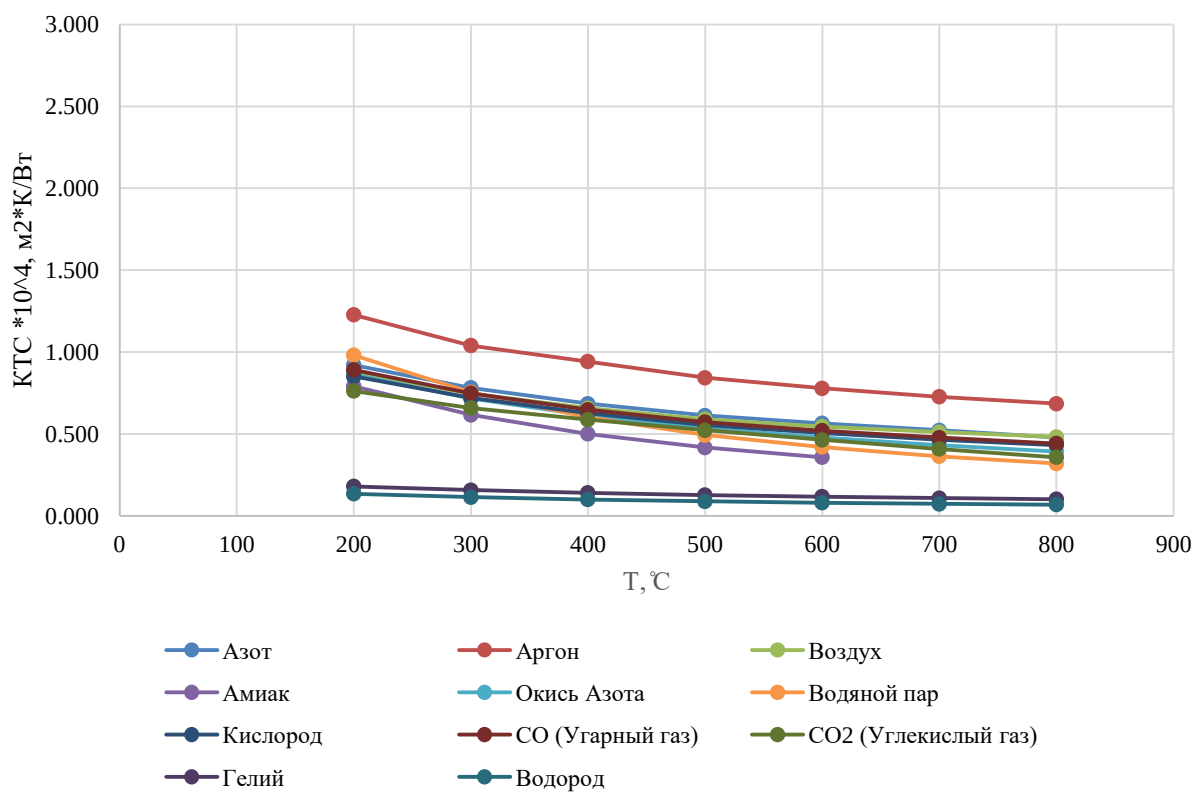


Рис. 6.51. KTC с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 4$  МПа

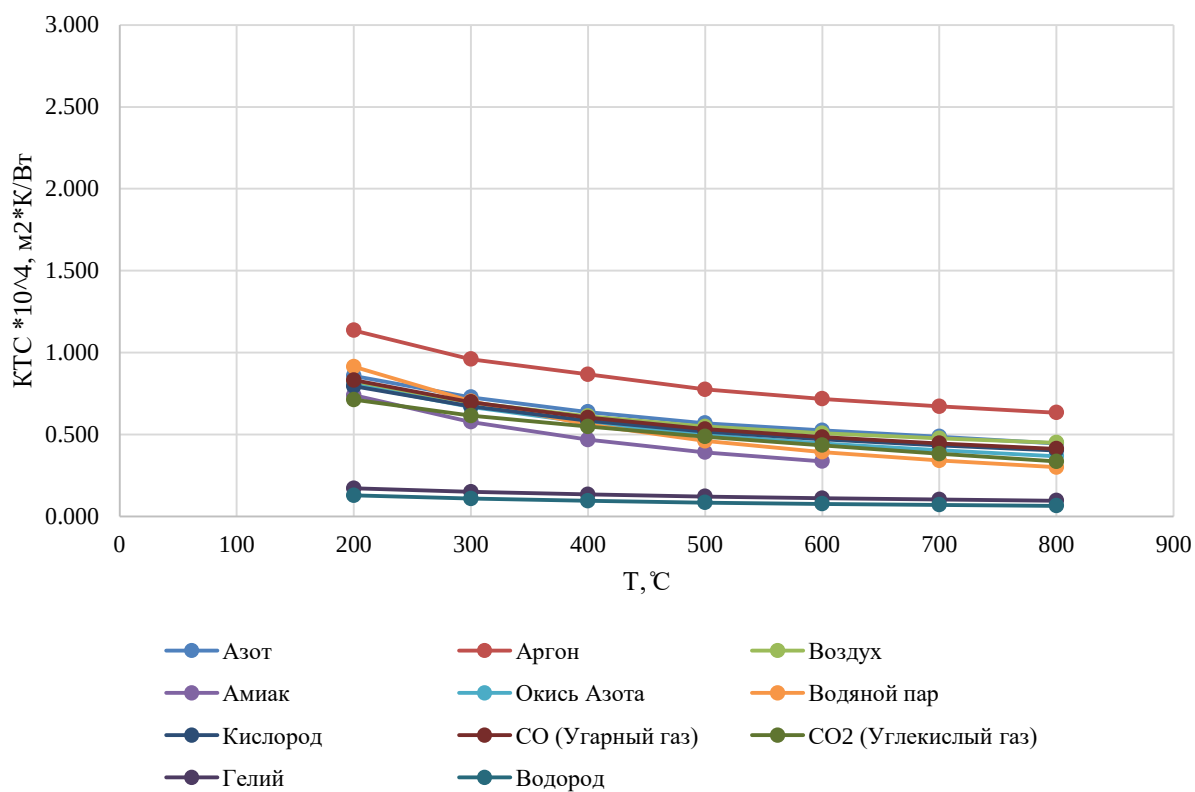


Рис. 6.52. KTC с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 5$  МПа



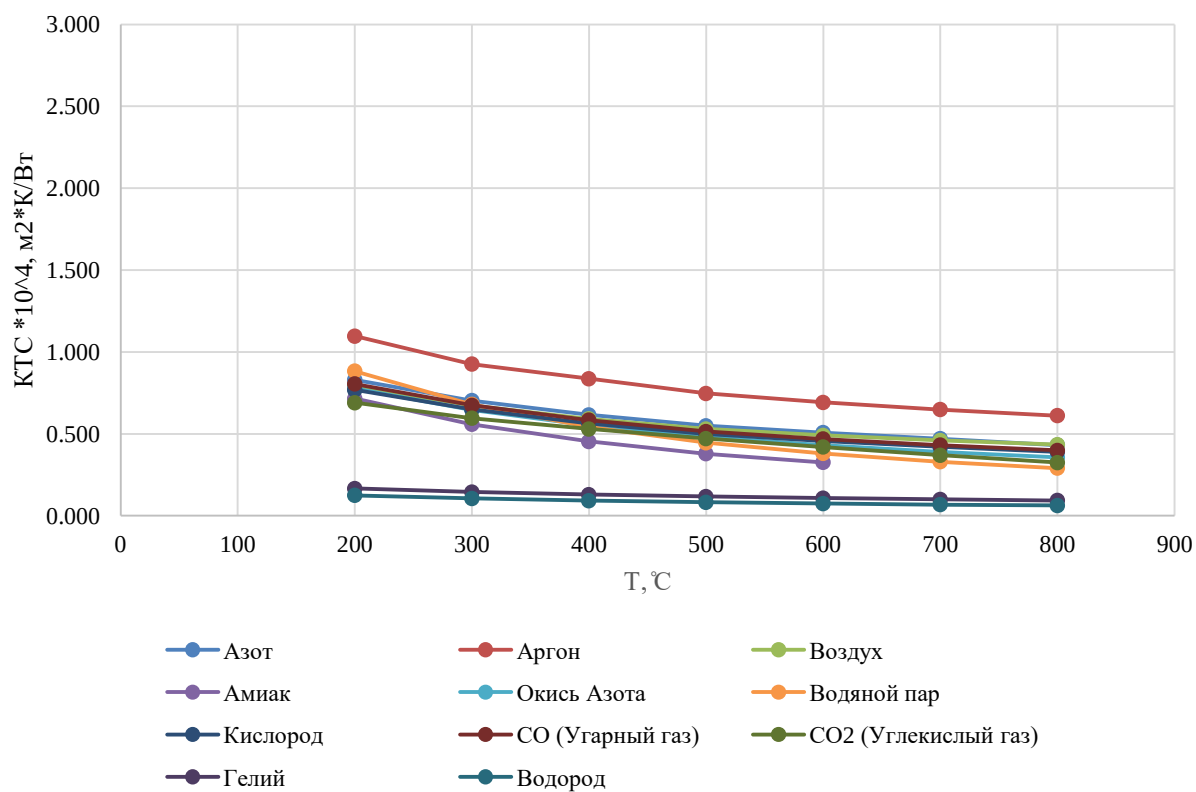


Рис. 6.53. КТС с учетом излучения при прижимном усилии  $P = 6$  МПа

В качестве граничных условий (рис. 6.54) для теплового расчета указаны  $A$  – температура верхней детали,  $B$  – тепловой поток в стенку второй детали  $q = 10000$  Вт/м<sup>2</sup>,  $C$  – излучение в окружающую среду.

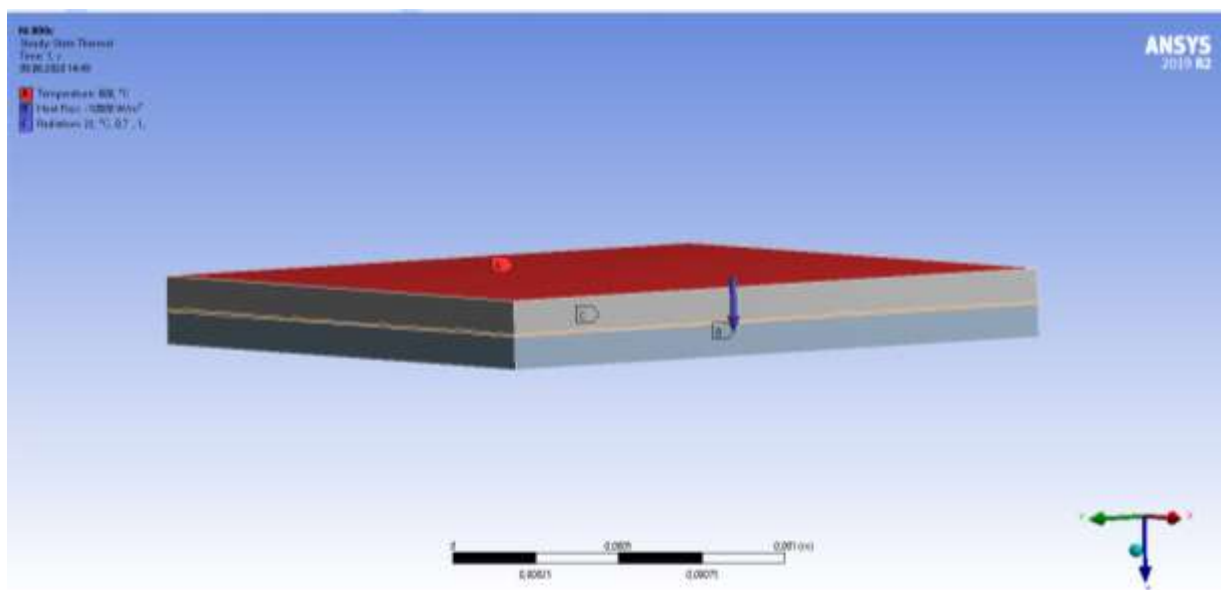


Рис. 6.54 – Установка граничных условий тепловой задачи.

Расчеты производились при температуре верхней детали от 200 до 800 °С. Результатом проведения теплового расчета является поле температур как всей конструкции в целом, так и отдельных её частей. Результаты расчета представлены на рисунках 6.55 – 6.61.

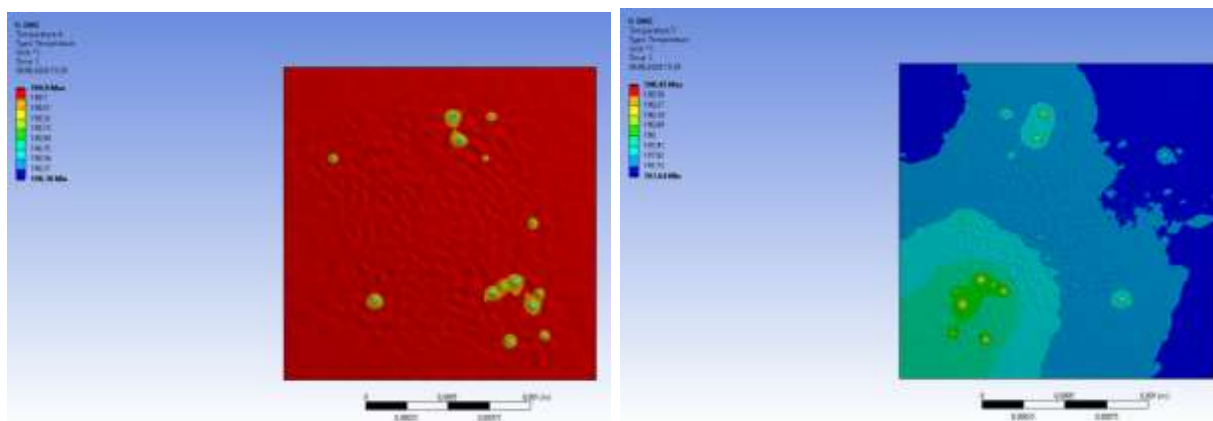


Рис. 6.55. Поля температур верхней и нижней поверхности при условии расчета  $T = 200$  °С.

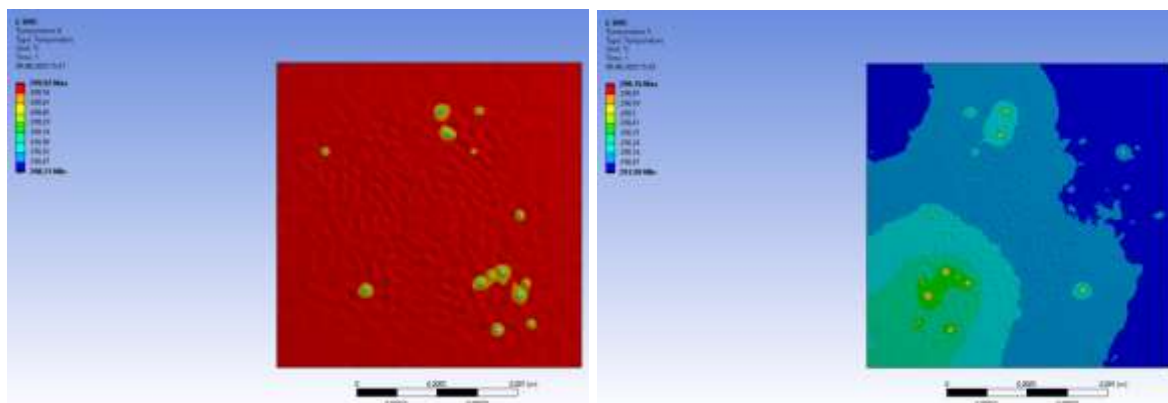


Рис. 6.56. Поля температур верхней и нижней поверхности при условии расчета  $T = 300$  °С.

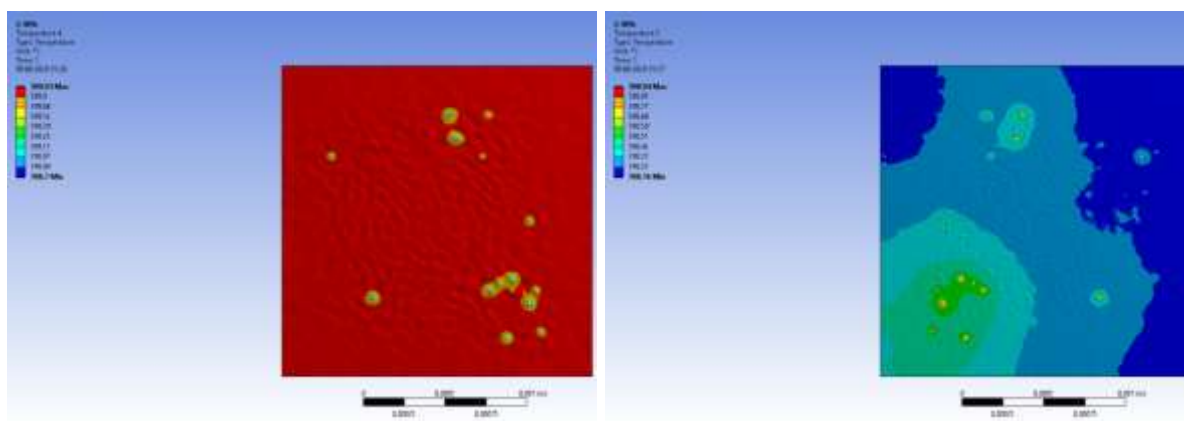


Рис. 6.57. Поля температур верхней и нижней поверхности при условии расчета  $T = 400$  °C.

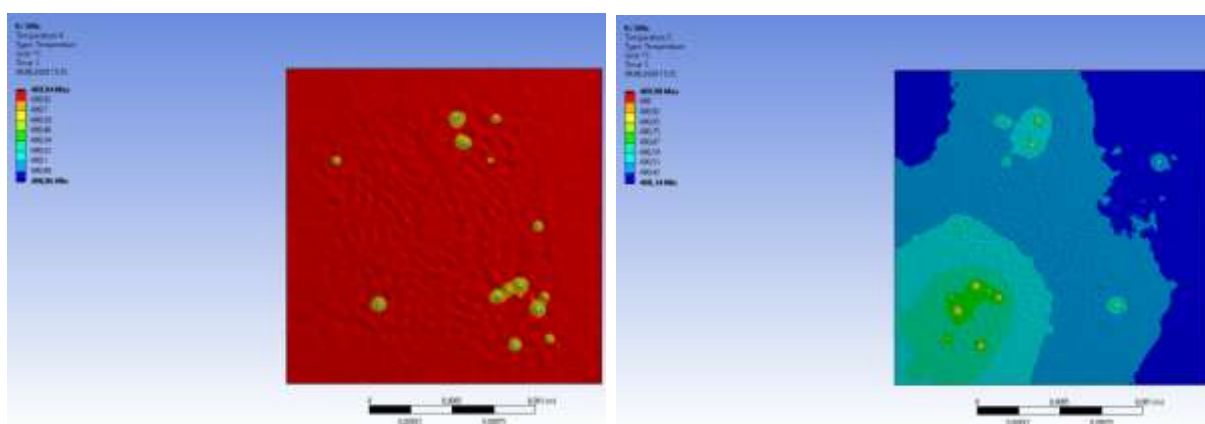


Рис. 6.58. Поля температур верхней и нижней поверхности при условии расчета  $T = 500$  °C.

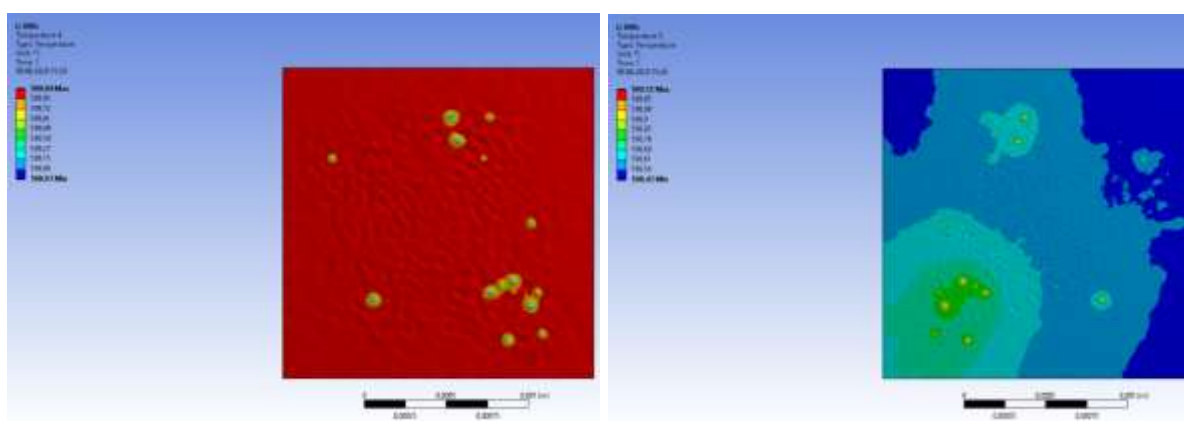


Рис. 6.59. Поля температур верхней и нижней поверхности при условии расчета  $T = 600$  °C.

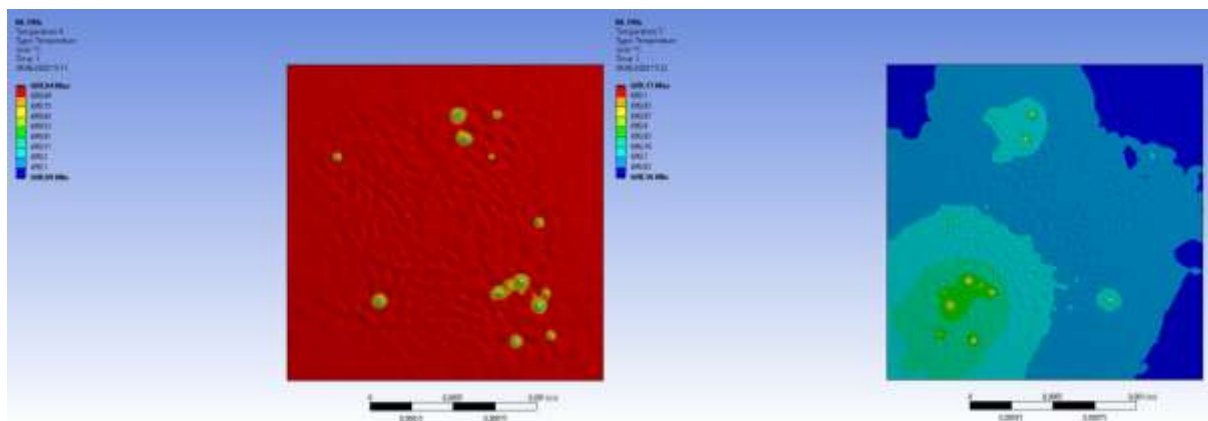


Рис. 6.60. Поля температур верхней и нижней поверхности при условии расчета  $T = 700$  °C.

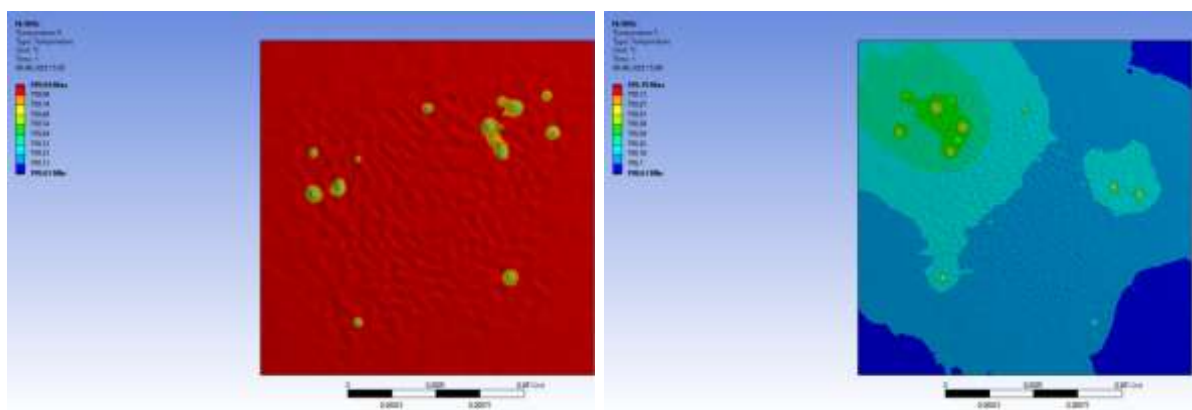


Рис. 6.61. Поля температур верхней и нижней поверхности при условии расчета  $T = 800$  °C.

Для расчета КТС необходимо определить средние температуры на поверхностях и, используя формулу, приведенную ниже, рассчитать КТС.

$$R_k = \Delta t_k / q \text{ [м}^2 \cdot \text{К/Вт]}$$

Результаты расчётов сведены в таблицу 6.6.

Таблица 6.6. Расчёт КТС с учётом межконтактной среды.

| $T_1, ^\circ\text{C}$ | $T_2, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t_k, ^\circ\text{C}$ | КТС, $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ |
|-----------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 200                   | 197,88                | 2,12                         | 0,000212                            |
| 300                   | 298,14                | 1,86                         | 0,000168                            |
| 400                   | 398,32                | 1,69                         | 0,000169                            |

|     |        |      |          |
|-----|--------|------|----------|
| 500 | 498,5  | 1,5  | 0,00015  |
| 600 | 59861  | 1,39 | 0,000139 |
| 700 | 698,7  | 1,3  | 0,00013  |
| 800 | 798,77 | 1,23 | 0,000123 |

На графике (см. рис. 6.62) представлены результаты, посчитанные с помощью разработанной методики и в программе Ansys.

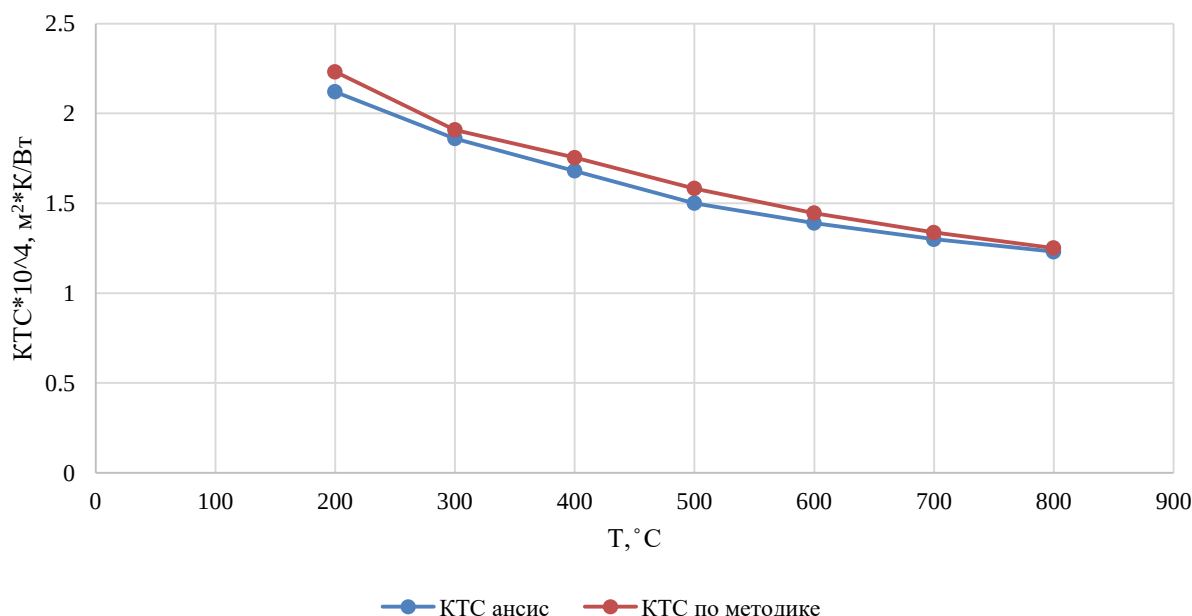


Рис. 6.62. Сравнение результатов расчёта КТС с учётом окружающей среды по методике с моделированием в Ansys.

Как видно из графика результаты отличаются на сотые доли, это можно объяснить неточным проектированием сближения поверхностей, за счет чего появляется разница в средней высоте межконтактного слоя. Это влияет на величину сопротивления среды и сопротивления мест фактического контакта.

### 6.9. Влияние покрытий на контактный теплообмен

При решении целого ряда прикладных задач по контактному теплообмену возникала необходимость направленного изменения КТС в сторону его повышения или снижения. Для решения проблемы снижения КТС проведен цикл специальных экспериментальных исследований отечественными и зарубежными

учеными [8,374-395]. В результате проведенных исследований предложены следующие рекомендации по снижению КТС:

- Напыление или гальваническое покрытие контактных поверхностей высокотеплопроводными и пластичными металлами.
- Введение в зону контакта высокотеплопроводных прокладок из мягких металлов (олово, свинец, кадмий и др.).
- Введение в зону контакта жидких металлов или сплавов (индий, галлиевая композиция).
- Заполнение межконтактного пространства высокотеплопроводными газами.
- Введение в зону контакта порошкообразных веществ повышенной теплопроводности.
- Заполнение зоны раздела теплостойкими жидкостями с металлическими порошками.
- Введение в зону контакта клеевых композиций, наполненных металлическими порошками.

Уменьшение сопротивления наблюдается при заполнении контактной зоны порошкообразными веществами (графитовый, медный или алюминиевый порошок и т. п.) Технология введения порошкообразных веществ в контактную зону включает операцию по притирке поверхностей в целях заполнения впадин микронеровностей этими веществами. Более ощутимые результаты по снижению сопротивления дает введение в контактную зону вязких веществ (глицерин), особенно в виде композиции с порошкообразными веществами. Так, для пары из малотеплопроводной стали 12Х18Н9Т введение в контактную зону глицерина с 20 % по весу графитового порошка снижает сопротивление в 4 раза. Недостатком данного способа снижения сопротивления  $R_k$  является малая термостойкость вязких компонентов, что приводит к их выгоранию с образованием воздушных включений, в конечном итоге повышающих сопротивления соединений. [380, 383].

Лишенным этого недостатка является метод заполнения зоны контакта газами (водород, гелий, углекислый газ) с различной теплопроводностью [375]. При заполнении высокотеплопроводными газами (водород, гелий) проводимость через среду приобретает основное значение, в то время как проводимость через непосредственный контакт относительно мала, откуда характер зависимости  $R_k = f(p)$  выражен менее резко. Наоборот, наличие малотеплопроводных газов приводит к относительному росту теплопроводности через реальные места контакта, а потому и характер зависимости  $R_k = f(p)$  более выражен [384].

Отдельный блок работ посвящен вопросам теплообмена через соединения на клеях. Результаты опытов показывают, что клеи, имеющие малую вязкость до отверждения (от 0,14 до 0,8 сек по конусному вискозиметру), улучшают тепловую проводимость клеевого шва, в то время как более вязкие клеи (вязкость  $> 2,6$  сек) проявляют себя, как теплоизоляционный слой, в первую очередь при малых давлениях отверждения. Для маловязких клеев увеличение тепловой проводимости в зависимости от увеличения давления отверждения почти не наблюдается. И лишь незначительный рост тепловой проводимости, особенно для высокотеплопроводных склеиваемых металлов (Д16Т), объясняется увеличением фактической площади контакта при сопряжении поверхностей, а отсюда и повышением тепловой проводимости соединений.

В целях повышения теплопроводности клеевых прослоек в неотвержденный клей вводились порошковые наполнители ферромагнитной природы и затем клеевая прослойка подвергалась воздействию магнитным полем. Образовавшиеся цепочечные структуры повышали теплопроводность прослойки. Подобным образом проводилась обработка клеевой прослойки с неферромагнитным наполнителем в электрическом поле.

Более результативным с точки зрения снижения термического сопротивления разъемных соединений оказывается использование жидкометаллических прослоек из легкоплавких металлов или сплавов. Достоинства этого метода снижения термического сопротивления соединения очевидны. Так, например, при усилиях сжатия  $p = 10^6$  Па введение в зону стыка

сплава свинца с висмутом в воздушной среде и натрия в вакууме снижает сопротивление  $R_k$  от 6 до 7 раз. Повышение давления ведет к сплошности теплового контакта. Особенно перспективен указанный метод при сопряжении поверхностей со значительными макроскопическими отклонениями, волнистостью или монтажными зазорами. Однако следует отметить, что использование этого метода связано со сложностью конструктивного оформления зоны контакта. К примеру, термические смазки нельзя использовать во многих важных электронных узлах из-за возможности испарения смазки и загрязнения близлежащих чувствительных компонентов, а также термические смазки имеют недостаток в том, они могут менять свою дислокацию с течением времени [379, 385].

Заслуживает внимания применение мягкометаллических прокладок [386-388] и фольги (свинцовые, оловянные, кадмиевые и т. п.). Так, для контактной пары из твердосплавного материала вольфрамовой группы марки ВК-8 и стали 45 введение в зону контакта кадмиевой или свинцовой прокладки даже при давлении порядка  $10^6$  Па повышает тепловую проводимость в 2 раза. Прокладки должны устанавливаться осторожно, чтобы избежать непреднамеренного увеличения контактного сопротивления из-за неправильного размещения.

Фольга привлекательна с теоретической точки зрения, но на практике она используется не очень часто. Это связано с тем, что мягкая фольга имеет тенденцию к образованию складок, что может привести к увеличению, а не к уменьшению контактного сопротивления. Кроме того, мягкая фольга непрочна и часто прогибается под собственным весом, что затрудняет ее обработку и эффективное нанесение.

Анализ экспериментальных данных дает основание полагать, что для уменьшения КТС в первую очередь следует отдать предпочтение покрытиям из мягких металлов [374] (кадмирование, свинцевание, лужение). Теплопроводность меди больше теплопроводности свинца в 11 раз, но в то же время твердость свинца по Бринеллю, наоборот, в 8-10 раз меньше, а потому термическое



сопротивление омедненных образцов на целый порядок превышает сопротивление освинцованных образцов.

При тепловом контакте поверхностей с нанесенными на них мягкометаллическими покрытиями происходит в основном пластическая деформация микронеровностей, причем происходят интенсивный рост фактической площади контакта и сокращение объемной составляющей межконтактной среды. Это значительно снижает термическое сопротивление контакта, так как наблюдается уменьшение величин термического сопротивления фактического контакта и сопротивления межконтактной среды.

Покрyтия из высокотеплопроводных и высокопластичных металлов рекомендуется наносить электрохимическим способом, который обеспечивает прочное сцепление осадка с основным металлом [377] и позволяет довольно легко варьировать толщину покрытия. Чекко и Йованович [378] показали, что фактическое тепловое сопротивление "идеального" соединения на два порядка меньше, чем типичные значения сопротивления сжатию, встречающиеся между шероховатыми поверхностями и покрытием. Таким образом, контактным сопротивлением между подложкой и покрытием можно пренебречь. Например, в этой же работе продемонстрировано, что разница температур между оловянным покрытием толщиной 5 мкм и подложкой составляет всего 0,27%.

Стоит отметить, что при плохом покрытии значения контактного сопротивления могут увеличиться на порядок [382]. Причиной этому является пористость, присутствующая в плохом покрытии. Это приводит к образованию воздушных пустот в покрытии, позволяет подложке окисляться, увеличивает вероятность химической реакции между покрытием и подложкой и уменьшает площадь контакта поверхности раздела.

Анализ влияния толщины покрытия показал, что при низкой шероховатости поверхности тонкое покрытие обеспечивает меньшее контактное сопротивление, чем толстое покрытие. Однако по мере увеличения шероховатости поверхности более толстое покрытие снижает КТС лучше, чем тонкое покрытие. Вероятно, это связано с тем, что более толстое покрытие деформируется сильнее, чтобы

заполнить большие зазоры на шероховатой поверхности, в то время как тонкому покрытию не хватает материала для заполнения этих зазоров. При более гладкой поверхности дополнительная толщина покрытия не требуется.

Материал покрытия и материал подложки имеют сильное взаимодействие [376]. Таким образом, влияние материала покрытия на контактное сопротивление зависит от материала подложки. Поскольку серебро мягче алюминия, эффективная микротвердость уменьшается с увеличением относительной толщины покрытия. Следовательно, можно сделать вывод, что более толстое покрытие может привести к лучшей теплопередаче до тех пор, пока объемное тепловое сопротивление покрытия не уменьшится. Оловянное покрытие на алюминиевой подложке демонстрирует аналогичное поведение уменьшения микротвердости с увеличением толщины. В этом случае падение более заметно из-за большой разницы между микротвердостью двух материалов. Другая тенденция наблюдается для твердого никелевого покрытия на более мягкой алюминиевой подложке. В этом случае тонкое покрытие, вероятно, было бы лучше для снижения стойкости.

Из этого следует, что общая оптимальная толщина покрытия не может быть предписана для всех вариантов покрытие-подложка. Но практика применения мягких металлических покрытий (свинец, кадмий) для снижения термического сопротивления контакта показывает, что наиболее целесообразно наносить металл толщиной, равной 2-3 максимальной высоты микронеровностей [374].

Также проводилось экспериментальное исследование [381] на тему влияния на КТС оксидных пленок на поверхностях контактов. Авторам удалось сделать выводы, что с увеличением толщины оксидной пленки растет КТС, равно как увеличение отношения суммы толщин оксидных пленок к сумме средних высот микронеровностей контактирующих поверхностей тоже ведет к росту контактного сопротивления. Но в подавляющем большинстве задач этим явлением можно пренебречь так как, окисные слои на поверхности металлов имеют толщину не более 1 мкм. Их теплопроводность в 3-30 раз меньше, чем у металлов. Поэтому

контактное сопротивление слабо зависит от теплопроводности окисного слоя при контакте волнистых и даже шероховатых поверхностей. Что подтверждается авторами в работе [379].

Таким образом, шероховатость поверхности является ключевым фактором при решении ряда контактных задач. Эксплуатационные характеристики контактирующих деталей конструкции напрямую определяются свойствами контакта сопряженных поверхностей. Процессы трения и изнашивания происходят именно на фактической площади контакта и зависят не только от свойств материала, но и от давления на этой площади, поскольку величина фактического давления определяет разрушение поверхностных пленок и возникновение адгезионных связей на контакте.

Наблюдения за рельефом поверхностей, подвергшихся гальваническому покрытию, показывают, что в ряде случаев качество поверхностей остается прежним в таких операциях, как лужение, кадмирование, меднение, но иногда происходит изменение ее исходной формы в сторону увеличения высоты неровностей (характерно для свинцевания). В последнем случае в период свинцевания применяют движущиеся резиновые щетки или подвергают механической обработке. В связи с этим геометрия покрытия будет повторять вид основного образца, как это показано на рисунке 6.63.

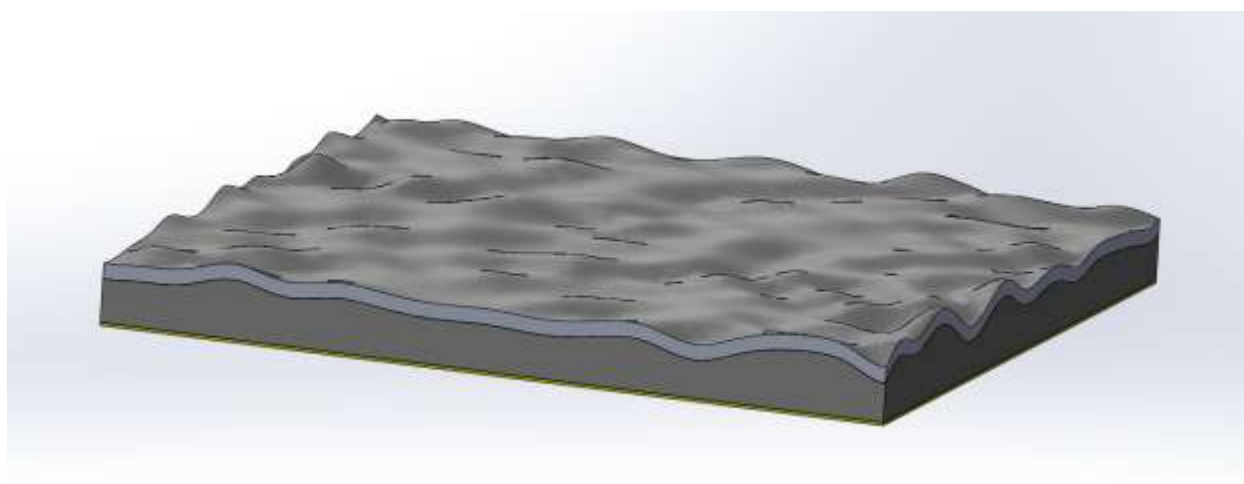


Рис. 6.63. Модель с нанесенным покрытием.

Практика применения металлических покрытий для снижения термического сопротивления контакта показала, что наиболее целесообразно наносить металл толщиной, равной 2-3 максимальной высоты микронеровностей (см. рис. 6.64).

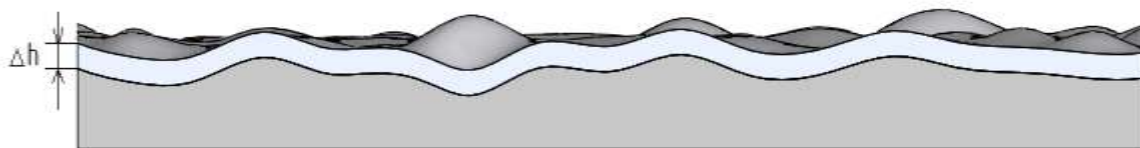


Рис. 6.64. Эскиз нанесенного покрытия

После моделирования двух поверхностей необходимо создать сборочную конструкцию. При создании сборочной конструкции необходимо выполнять ряд условий, без которых дальнейшее моделирование будет бесполезно, а именно:

1. Плоскости при взгляде сверху (координата  $z$ ) совпадают по всем граням. Для этого необходимо, чтобы обе детали были одинаковых размеров, а по их граням были выставлены необходимые условия совпадения.
2. Расстояние между контактирующими деталями должно быть с учетом микровыступов обеих поверхностей.

Полученная сборочная конструкция представлена на рисунке 6.65.

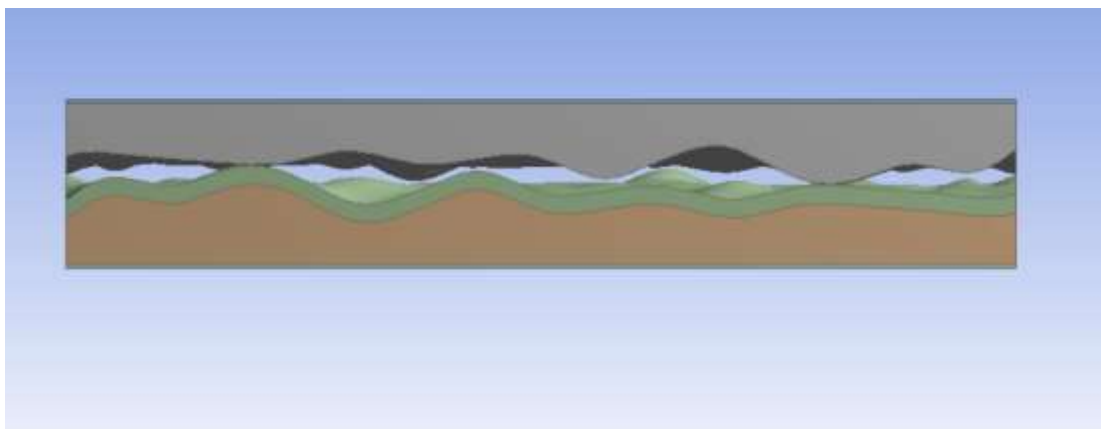


Рис. 6.65. Модель шероховатость в среде Ansys.

Весь проведенный алгоритм построения 3-х мерной модели шероховатость для наглядности показан для модели с шероховатостью  $Ra = 9,062$  мкм, в дальнейшем расчет будет проводится с моделью шероховатость

которой равна  $R_a = 0,82$  мкм, алгоритм построения которой аналогичен представленному.

После передачи сеточной модели в модуль расчета для нее были заданы граничные условия (см. рисунок 6.66) следующего типа:

- Нагрузка А: к нижней границе приложено граничное условие жесткой заделки
- Нагрузка В: к боковым границам образцов приложены граничные условия скользящей заделки без трения
- Нагрузка С: к верхней границе приложено давление  $P$ , которое изменяется в диапазоне от 0,1 до 1 МПа.

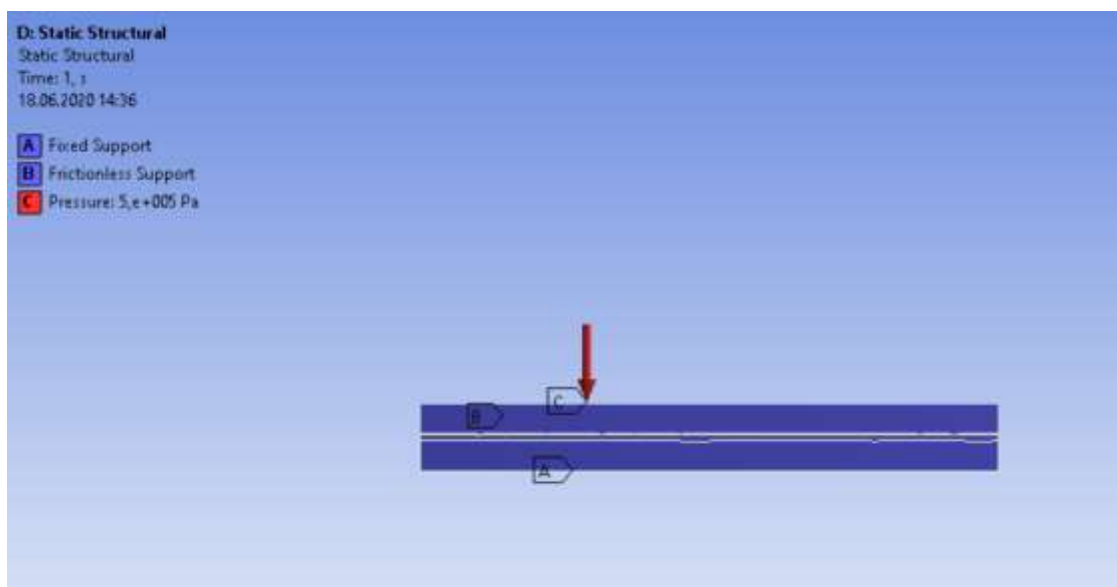


Рис. 6.66. Схема граничных условий расчёта

Результатом прочностного анализа является поле эквивалентных напряжений и межконтактного давления, величина проникновения поверхности одной детали в поверхность другой детали.

Расчет ведется в модуле Static Structural, в результате необходимо увидеть среднее значение контакта, поэтому в Solution добавлен Contact Tool, в который добавляем отображение значений давления в зоне контакта, полученные значения межконтактного давления с использованием напыления и без него показаны соответственно на рисунке 6.67 и 6.68.

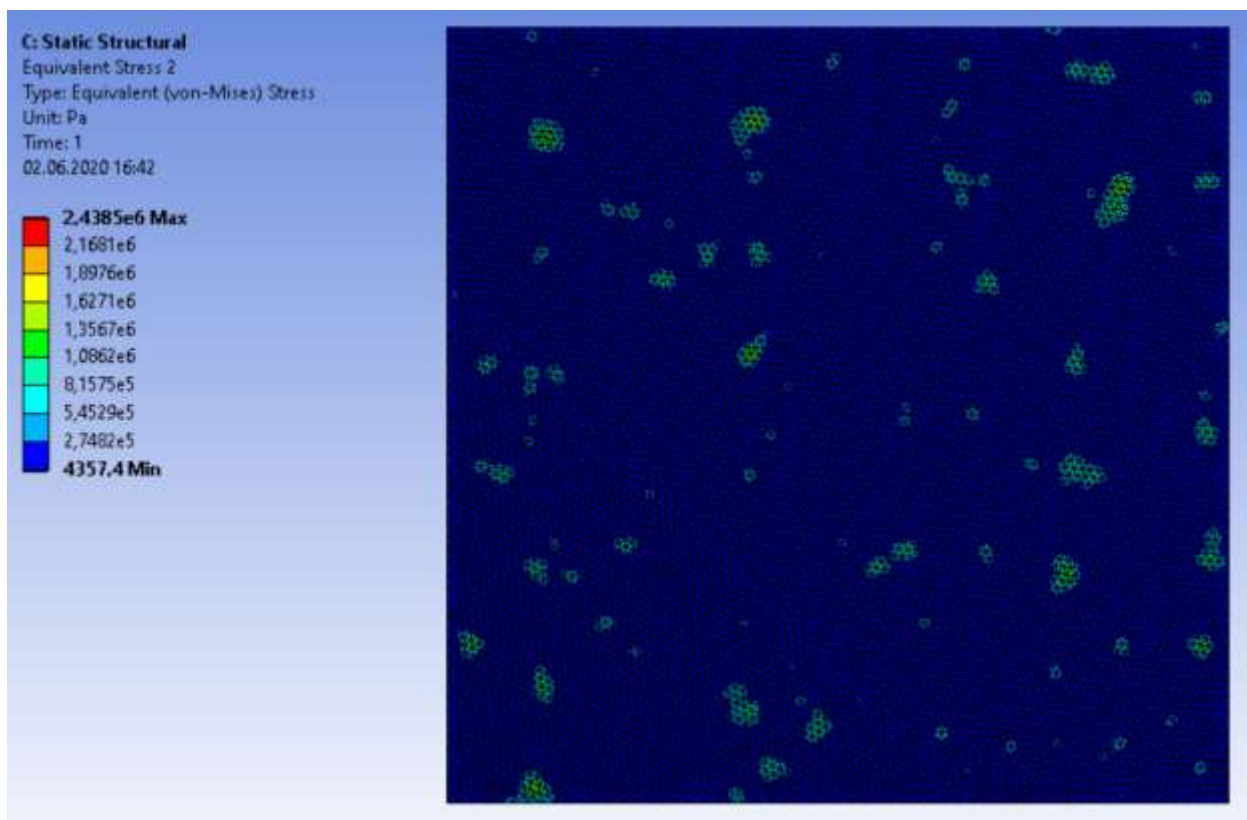


Рис. 6.67. Поле эквивалентных напряжений для расчётного случая с использованием напыления

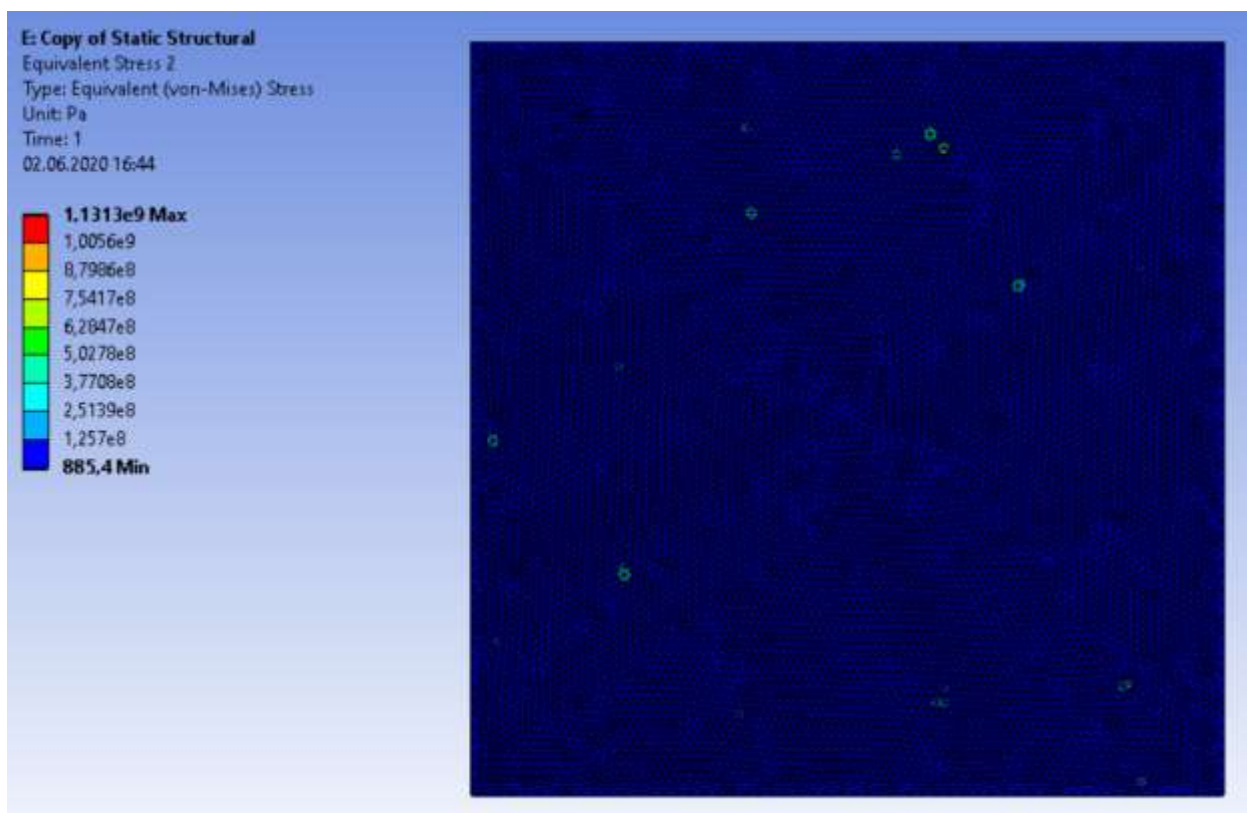


Рис. 6.68. Поле эквивалентных напряжений для расчётного случая без использования напыления

Получено среднее значение эквивалентных напряжений, что необходимо при следующем подэтапе – моделирование контактного теплообмена.

Для каждого значения давлений рассчитаны значения перемещения координаты верхней плоскости для нахождения величины проникновения поверхности детали в поверхность другой детали.

Таблица 6.7. Смещение при различных давлениях

| Р, Мпа | Т, К | Z <sub>1</sub> , мкм | Z <sub>2</sub> , мкм | Смещение, мкм |
|--------|------|----------------------|----------------------|---------------|
| 0,1    | 100  | 757,301              | 756,938              | 0,362857      |
| 0,3    | 100  | 757,15               | 756,714              | 0,435526      |
| 0,7    | 100  | 757,011              | 756,553              | 0,458582      |
| 0,9    | 100  | 756,969              | 756,503              | 0,46631       |
| 0,9    | 200  | 756,969              | 756,503              | 0,46631       |

На предыдущем шаге были получены значения давлений при контакте. Воспользовавшись полученными данными, мы можем определить координаты сдвига контактируемых поверхностей, это позволяет смоделировать давление для увеличения фактической площади контакта. Такой метод позволит не нагружать модель прочностной задачей, что значительно сократит время расчета, что для большого количества моделей критично. Микрогеометрия поверхности смоделирована согласно способу, указанному в разделе 6.6.

С помощью настроек сетки удалось получить ее оптимальные размеры, благодаря которым можно легко увидеть микронеровности. В местах контакта для обеспечения более точного результата сетка сгущалась. Такие настройки позволяют более детально увидеть поле температур в зоне контакта.

Расчет проводился для различных моделей при различных значениях межконтактного давления и температурах (см. рис. 6.69).



| Table of All Parameters |                          |                       |            | Table of Design Points |    |                |                       |                            |                            |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----|----------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
|                         | A                        | B                     | C          | D                      |    |                |                       |                            |                            |
| 1                       | ID                       | Parameter Name        | Value      | Unit                   | 1  | Name           | P1 - Temperature LPD3 | P2 - Temperature Magnitude | P3 - Temperature 2 Average |
| 2                       | Input Parameters         |                       |            |                        | 2  | Units          | m                     | C                          | C                          |
| 3                       | Steady-State Thermal (S) |                       |            |                        | 3  | DP 0 (Control) | 1.5073E-07            | 300                        | 295.96                     |
| 4                       | X2                       | Temperature Magnitude | 300        | C                      | 4  | DP 1           | 1.3633E-07            | 200                        | 195.98                     |
| 5                       | Cap of Geometry (G)      |                       |            |                        | 5  | DP 2           | 1.3633E-07            | 100                        | 88.854                     |
| 6                       | P1                       | Translate LPD3        | 1.3633E-07 | m                      | 6  | DP 3           | 1.5073E-07            | 300                        | 295.96                     |
| 7                       | New input parameter      | New name              | New value  |                        | 7  | DP 4           | 1.3633E-07            | 200                        | 195.98                     |
| 8                       | Output Parameters        |                       |            |                        | 8  | DP 5           | 1.3633E-07            | 100                        | 88.854                     |
| 9                       | Steady-State Thermal (S) |                       |            |                        | 9  | DP 6           | 1.2344E-07            | 300                        | 282.24                     |
| 10                      | P3                       | Temperature 2 Average | 295.96     | C                      | 10 | DP 7           | 1.2344E-07            | 200                        | 185.92                     |
| 11                      | P4                       | Temperature 3 Average | 290.18     | C                      | 11 | DP 8           | 1.2344E-07            | 100                        | 85.305                     |
| 12                      | New output parameter     | New name              | New value  |                        | 12 | DP 9           | 1.173E-07             | 300                        | 280.94                     |
| 13                      | Charts                   |                       |            |                        | 13 | DP 10          | 1.173E-07             | 200                        | 179.72                     |
|                         |                          |                       |            |                        | 14 | DP 11          | 1.173E-07             | 100                        | 88.82                      |
|                         |                          |                       |            |                        | 15 | DP 12          | 1.0074E-07            | 300                        | 289.84                     |
|                         |                          |                       |            |                        | 16 | DP 13          | 1.0074E-07            | 200                        | 180.04                     |
|                         |                          |                       |            |                        | 17 | DP 14          | 1.0074E-07            | 100                        | 88.827                     |
|                         |                          |                       |            |                        | 18 | DP 15          | 1.0073E-07            | 300                        | 289.93                     |
|                         |                          |                       |            |                        | 19 | DP 16          | 1.5825E-07            | 200                        | 176.36                     |
|                         |                          |                       |            |                        | 20 | DP 17          | 1.5825E-07            | 100                        | 88.81                      |

Рис. 6.69. Реализация расчета в среде Ansys для различных давлений и температур

Для сравнительного анализа результаты представлены для двух случаев: с использованием напыления и без него при прочих равных условиях.

Из рисунка 6.70 можно увидеть, что максимальные значения температур находятся в зонах непосредственного контакта, что соответствует реальности.

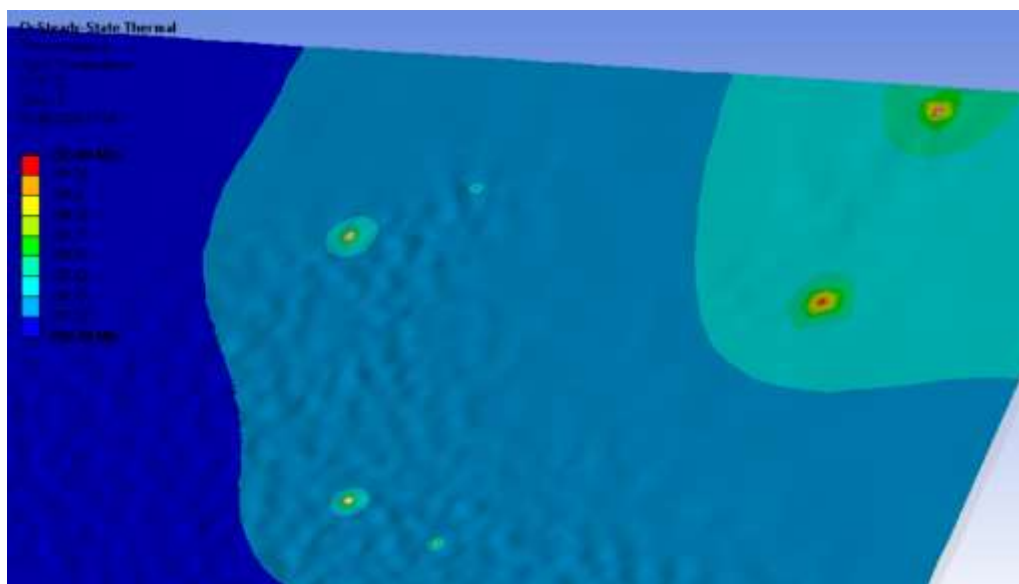


Рис. 6.70. Поле температур контактирующей поверхности при  $p_k = 1 \text{ МПа}$ ,  $T = 573 \text{ К}$ ,  $q = 10 \text{ кВт/м}^2$

В данном разделе показаны лишь рисунки одного из расчетов. Остальные данные расчета представлены в таблице 6.8.

КТС определялось как отношение разности средних значений температур на контактирующих поверхностях и теплового потока, отводимого от конструкции.



$$R_k = \frac{\Delta T_k}{q_{cp}}$$

Зависимость КТС от давления для случая с напылением представлена на рис. 6.71.

Таблица 6.8. Результаты расчёта КТС с учётом напыления.

| Р, Мпа | покрытие | Т, К | $T_{cp}^{гор}$ , К | $T_{cp}^{хол}$ , К | КТС,<br>$10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ |
|--------|----------|------|--------------------|--------------------|-------------------------------------------------|
| 0,1    | нет      | 100  | 99,87              | 35,46              | 64,41                                           |
| 0,1    | нет      | 200  | 199,88             | 142,21             | 57,67                                           |
| 0,1    | нет      | 300  | 299,9              | 248,34             | 51,56                                           |
| 0,1    | есть     | 100  | 99,9               | 75,96              | 23,94                                           |
| 0,1    | есть     | 200  | 199,91             | 177,52             | 22,39                                           |
| 0,1    | есть     | 300  | 299,92             | 278,72             | 21,2                                            |
| 0,3    | нет      | 100  | 99,9               | 69,24              | 30,65                                           |
| 0,3    | нет      | 200  | 199,91             | 172,56             | 27,34                                           |
| 0,3    | нет      | 300  | 299,92             | 275,38             | 24,54                                           |
| 0,3    | есть     | 100  | 99,93              | 84,19              | 15,74                                           |
| 0,3    | есть     | 200  | 199,94             | 185,23             | 14,7                                            |
| 0,3    | есть     | 300  | 299,94             | 286,02             | 13,92                                           |
| 0,5    | нет      | 100  | 99,91              | 62,51              | 37,4                                            |
| 0,5    | нет      | 200  | 199,92             | 166,53             | 33,38                                           |
| 0,5    | нет      | 300  | 299,92             | 269,99             | 29,94                                           |
| 0,5    | есть     | 100  | 99,94              | 90,36              | 9,58                                            |
| 0,5    | есть     | 200  | 199,95             | 191                | 8,95                                            |
| 0,5    | есть     | 300  | 299,95             | 291,48             | 8,47                                            |
| 0,7    | нет      | 100  | 99,9               | 63,42              | 36,48                                           |
| 0,7    | нет      | 200  | 199,91             | 167,35             | 32,56                                           |
| 0,7    | нет      | 300  | 299,92             | 270,72             | 29,2                                            |

|     |      |     |        |        |       |
|-----|------|-----|--------|--------|-------|
| 0,7 | есть | 100 | 99,96  | 92,82  | 7,14  |
| 0,7 | есть | 200 | 199,96 | 193,28 | 6,69  |
| 0,7 | есть | 300 | 299,97 | 293,62 | 6,35  |
| 0,9 | нет  | 100 | 99,94  | 69,01  | 30,93 |
| 0,9 | нет  | 200 | 199,94 | 172,35 | 27,59 |
| 0,9 | нет  | 300 | 299,95 | 275,19 | 24,76 |
| 0,9 | есть | 100 | 99,94  | 90,36  | 9,58  |
| 0,9 | есть | 200 | 199,95 | 191    | 8,95  |
| 0,9 | есть | 300 | 299,95 | 291,48 | 8,47  |
| 1   | нет  | 100 | 99,94  | 69,01  | 30,93 |
| 1   | нет  | 200 | 199,94 | 172,35 | 27,59 |
| 1   | нет  | 300 | 299,95 | 275,19 | 24,76 |
| 1   | есть | 100 | 99,94  | 90,34  | 9,6   |
| 1   | есть | 200 | 199,95 | 190,98 | 8,96  |
| 1   | есть | 300 | 299,95 | 291,47 | 8,48  |

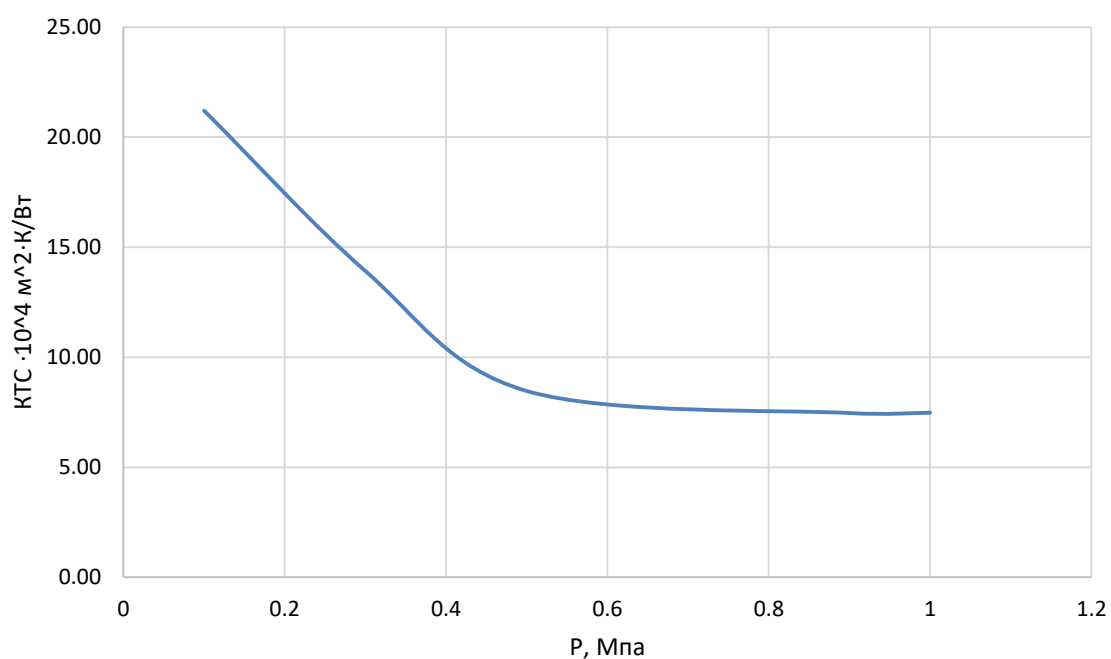


Рис. 6.71. График зависимости КТС от давления для случая с напылением

Анализ графических зависимостей показал, что при давлении 0,5 МПа снижение КТС значительно уменьшается. На рис. 6.72 представлено сравнение КТС при использовании напыления и без.

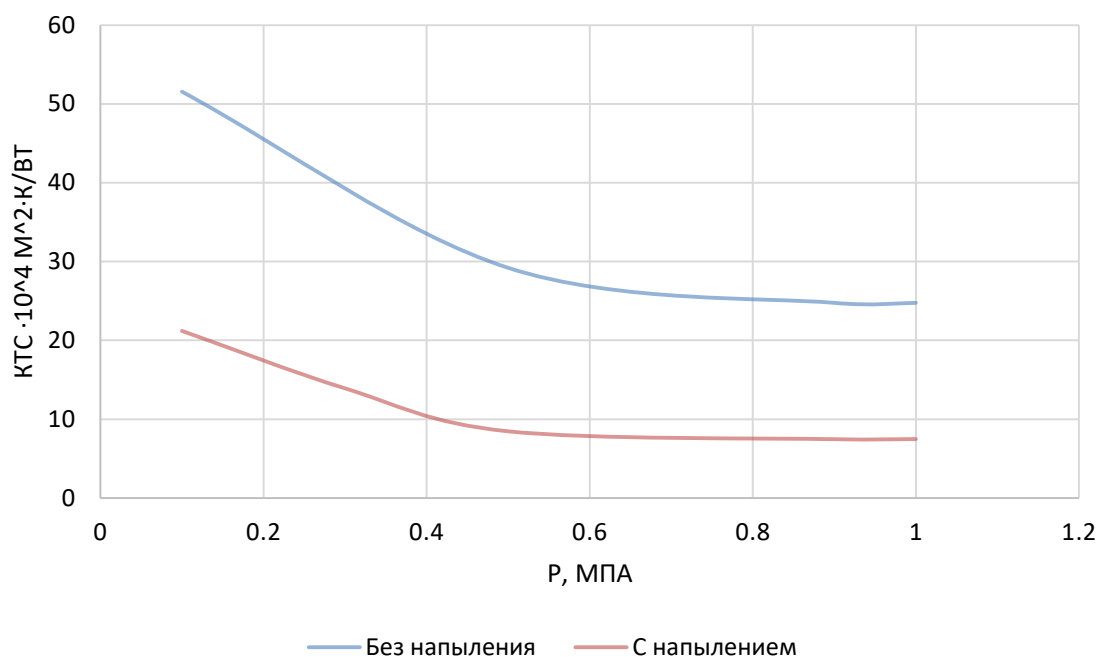


Рис. 6.72. Сравнительный анализ КТС с использованием и без использования напыления

Как видно из результатов расчета при применении напыления значение КТС уменьшается в 2-3 раза, что соответствует экспериментальным данным.

Для сравнительного анализа расчеты проведены для напылений с использованием хрома и меди, результаты расчетов приведены на рисунках 6.73 и 6.74 соответственно, а также в таблицах 6.9, 6.11 и 6.10, 6.12 соответственно. На рис. 6.76 и 6.77 представлены зависимости КТС от давления для случаев использования хрома и меди соответственно. Сравнение использования различных напылений (хром, медь, свинец) представлено на рис. 6.78.

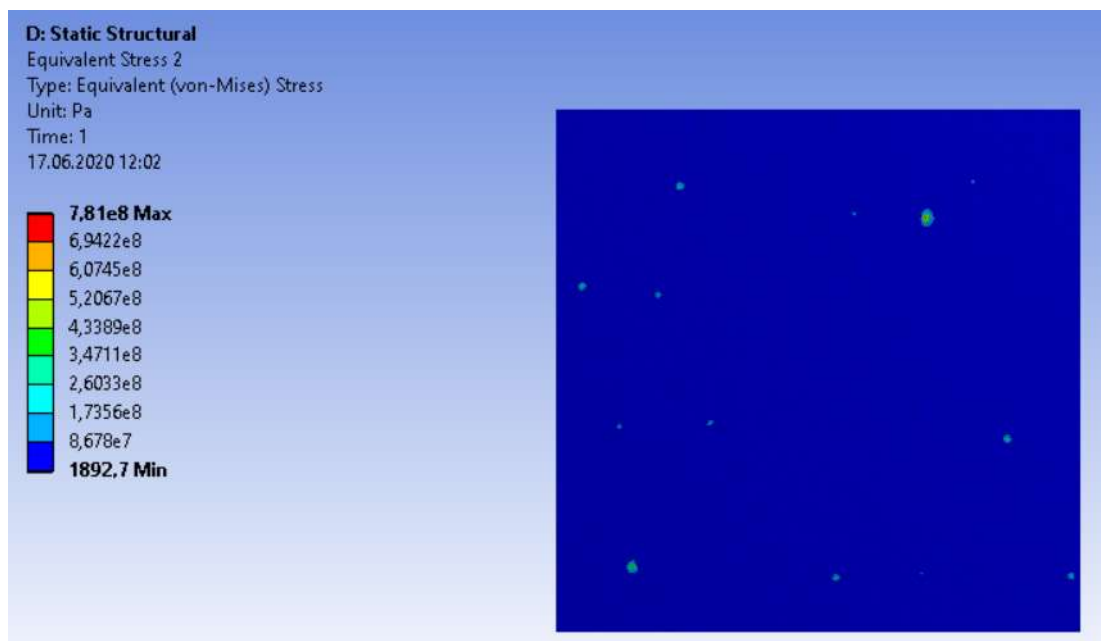


Рис. 6.73. Поля распределения эквивалентного напряжения, напыление – хром,  
 $P_k = 5 \cdot 10^5$  Па

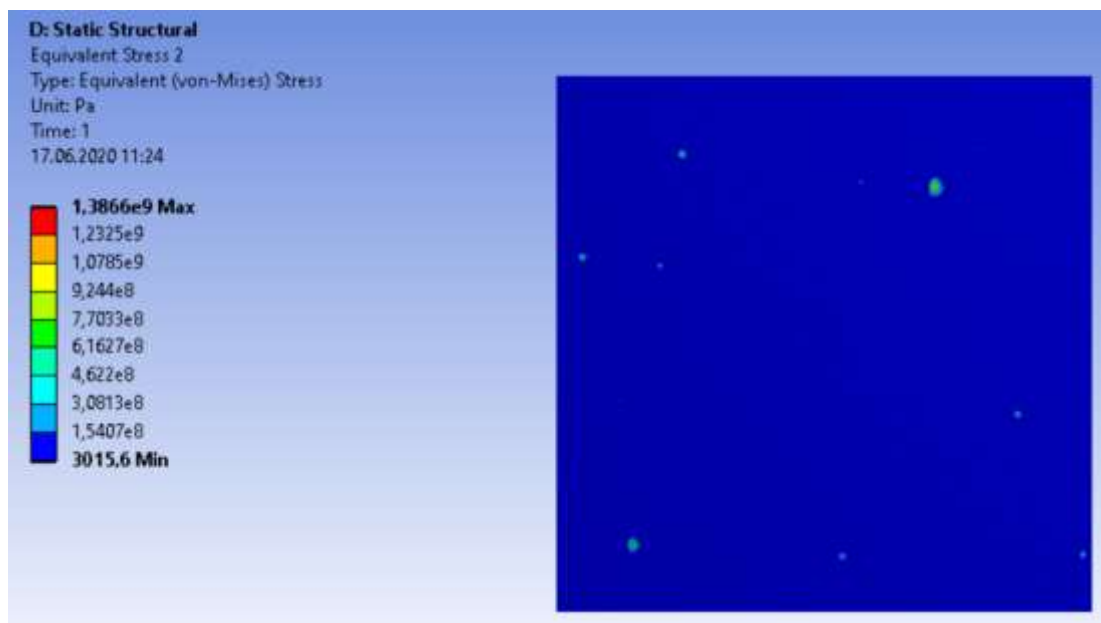


Рис. 6.74. Поля распределения эквивалентного напряжения, напыление – медь,  
 $P_k = 5 \cdot 10^5$  Па

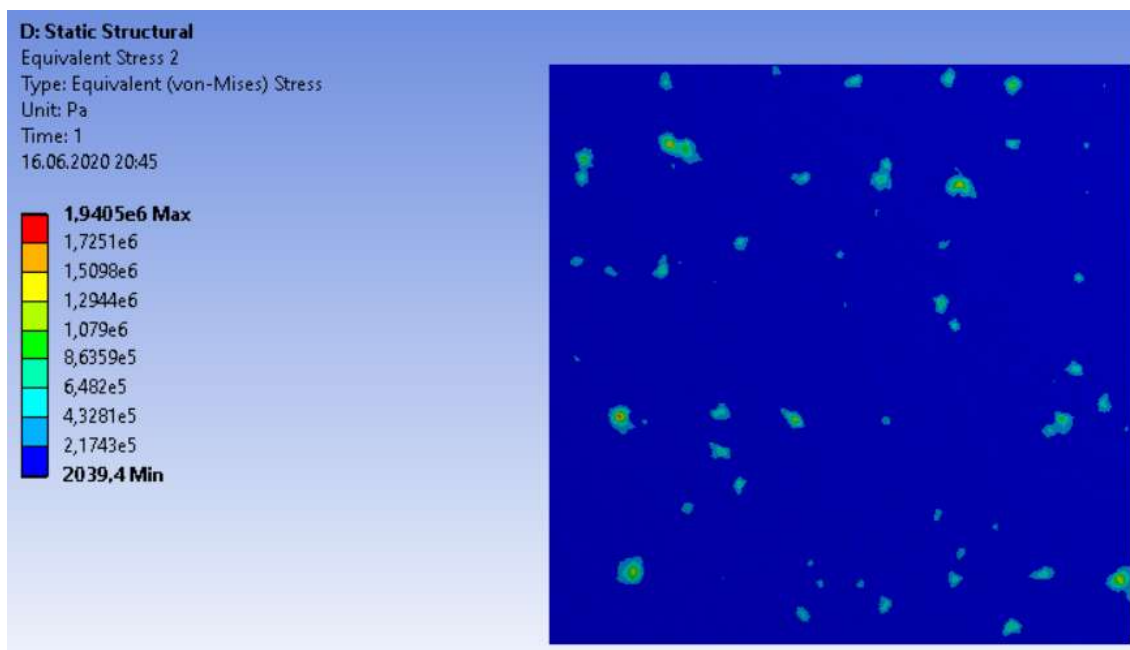


Рис. 6.75. Поля распределения эквивалентного напряжения, напыление – свинец,  
 $P_k = 5 \cdot 10^5$  Па

Таблица 6.9. Смещение для расчётного случая при хромировании

| P, МПа | Z <sub>1</sub> , мкм | Z <sub>2</sub> , мкм | Смещение, мкм |
|--------|----------------------|----------------------|---------------|
| 1      | 757,33               | 756,99               | 0,336309      |
| 0,9    | 757,34               | 757,01               | 0,330764      |
| 0,7    | 757,38               | 757,06               | 0,323435      |
| 0,5    | 757,43               | 757,11               | 0,317304      |
| 0,3    | 757,49               | 757,18               | 0,300735      |
| 0,1    | 757,58               | 757,33               | 0,256248      |

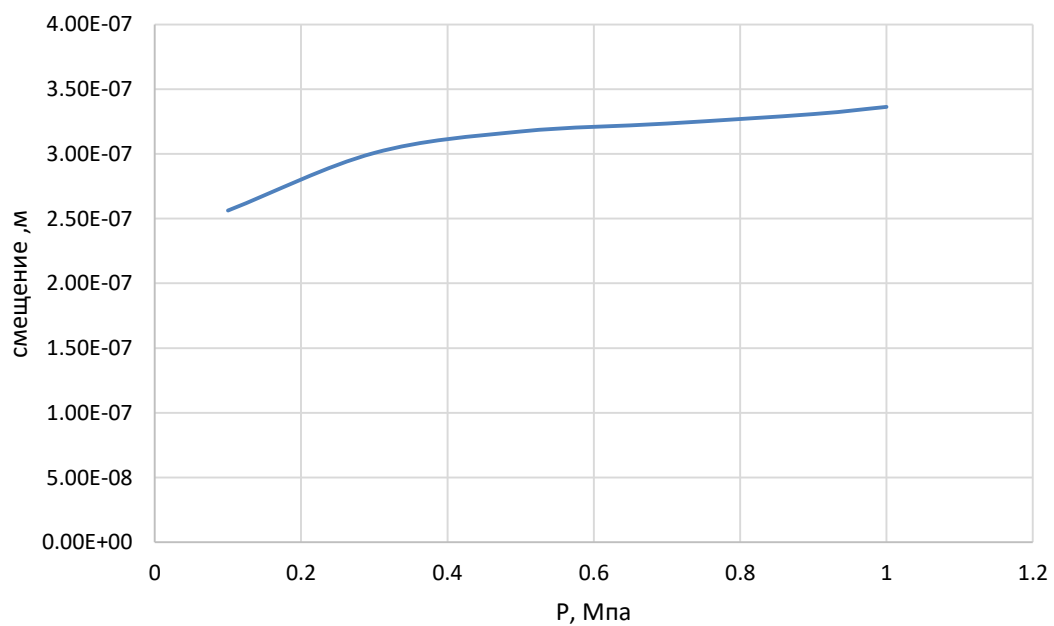


Рис. 6.76. График смещения при различных давлениях для напыления – хром.

Таблица 6.10. Смещение для расчётного случая при омеднении

| P, МПа | Z <sub>1</sub> , мкм | Z <sub>2</sub> , мкм | Смещение, мкм |
|--------|----------------------|----------------------|---------------|
| 1      | 757,28               | 756,91               | 0,366327      |
| 0,9    | 757,29               | 756,93               | 0,356353      |
| 0,7    | 757,32               | 756,98               | 0,335917      |
| 0,5    | 757,37               | 757,05               | 0,321013      |
| 0,3    | 757,44               | 757,13               | 0,310595      |
| 0,1    | 757,55               | 757,28               | 0,275564      |

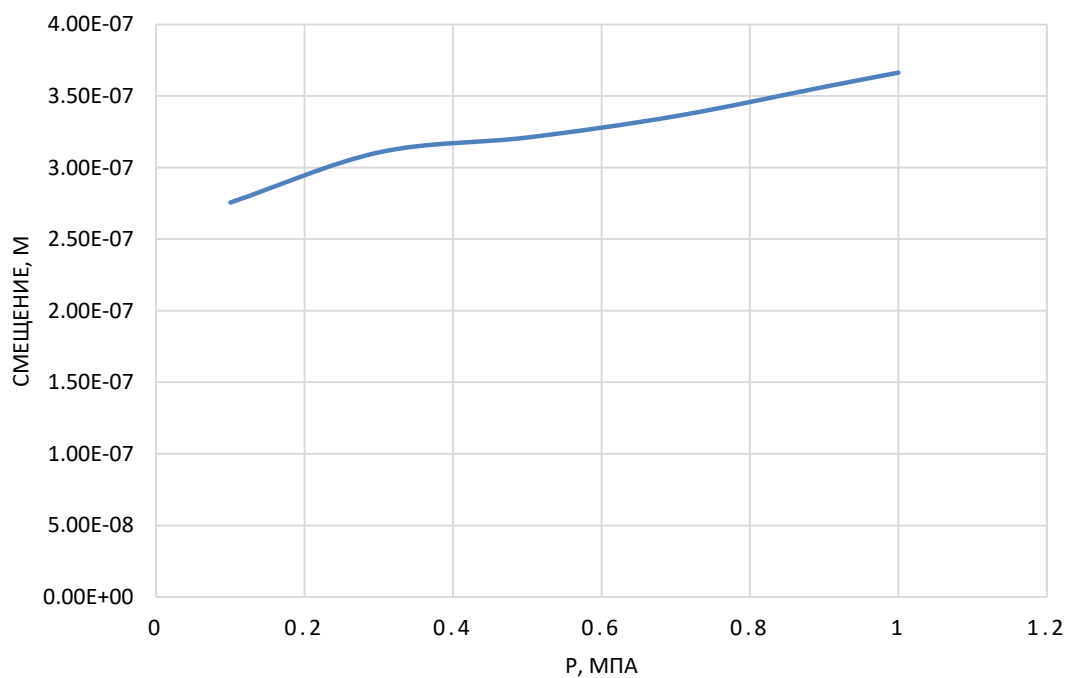


Рис. 6.77. График смещения при различных давлениях для напыления – медь

Таблица 6.11. Результаты расчёта КТС с учётом напыления – хром.

| Р, Мпа | Т, К | $T_{\text{ср}}^{\text{гор}}, \text{К}$ | $T_{\text{ср}}^{\text{хол}}, \text{К}$ | КТС,<br>$10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ |
|--------|------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1      | 300  | 299,96                                 | 290,15                                 | 9,81                                            |
| 1      | 200  | 199,96                                 | 189,41                                 | 10,55                                           |
| 1      | 100  | 99,95                                  | 88,50                                  | 11,45                                           |
| 0,9    | 300  | 299,96                                 | 290,15                                 | 9,81                                            |
| 0,9    | 200  | 199,96                                 | 189,41                                 | 10,55                                           |
| 0,9    | 100  | 99,95                                  | 88,50                                  | 11,45                                           |
| 0,7    | 300  | 299,92                                 | 282,24                                 | 17,68                                           |
| 0,7    | 200  | 199,92                                 | 180,78                                 | 19,14                                           |
| 0,7    | 100  | 99,90                                  | 78,98                                  | 20,93                                           |
| 0,5    | 300  | 299,94                                 | 281,24                                 | 18,69                                           |
| 0,5    | 200  | 199,93                                 | 179,72                                 | 20,21                                           |
| 0,5    | 100  | 99,92                                  | 77,86                                  | 22,06                                           |
| 0,3    | 300  | 299,94                                 | 281,17                                 | 18,77                                           |

|     |     |        |        |       |
|-----|-----|--------|--------|-------|
| 0,3 | 200 | 199,94 | 179,65 | 20,29 |
| 0,3 | 100 | 99,93  | 77,78  | 22,15 |
| 0,1 | 300 | 299,93 | 280,88 | 19,05 |
| 0,1 | 200 | 199,92 | 179,36 | 20,56 |
| 0,1 | 100 | 99,91  | 77,49  | 22,42 |

Таблица 6.12. Результаты расчёта КТС с учётом напыления – медь.

| Р, Мпа | Т, К | $T_{\text{ср}}^{\text{гор}}, \text{К}$ | $T_{\text{ср}}^{\text{хол}}, \text{К}$ | КТС,<br>$10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ |
|--------|------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1      | 300  | 299,92                                 | 288,22                                 | 11,70                                           |
| 1      | 200  | 199,91                                 | 187,00                                 | 12,91                                           |
| 1      | 100  | 99,90                                  | 85,50                                  | 14,40                                           |
| 0,9    | 300  | 299,92                                 | 288,22                                 | 11,70                                           |
| 0,9    | 200  | 199,91                                 | 187,00                                 | 12,91                                           |
| 0,9    | 100  | 99,90                                  | 85,50                                  | 14,40                                           |
| 0,7    | 300  | 299,93                                 | 284,14                                 | 15,79                                           |
| 0,7    | 200  | 199,92                                 | 182,48                                 | 17,44                                           |
| 0,7    | 100  | 99,91                                  | 80,46                                  | 19,46                                           |
| 0,5    | 300  | 299,94                                 | 285,07                                 | 14,86                                           |
| 0,5    | 200  | 199,93                                 | 183,53                                 | 16,40                                           |
| 0,5    | 100  | 99,92                                  | 81,64                                  | 18,29                                           |
| 0,3    | 300  | 299,94                                 | 285,43                                 | 14,51                                           |
| 0,3    | 200  | 199,93                                 | 183,94                                 | 16,00                                           |
| 0,3    | 100  | 99,93                                  | 82,11                                  | 17,82                                           |
| 0,1    | 300  | 299,92                                 | 283,92                                 | 16,00                                           |
| 0,1    | 200  | 199,91                                 | 182,26                                 | 17,66                                           |
| 0,1    | 100  | 99,90                                  | 80,22                                  | 19,68                                           |



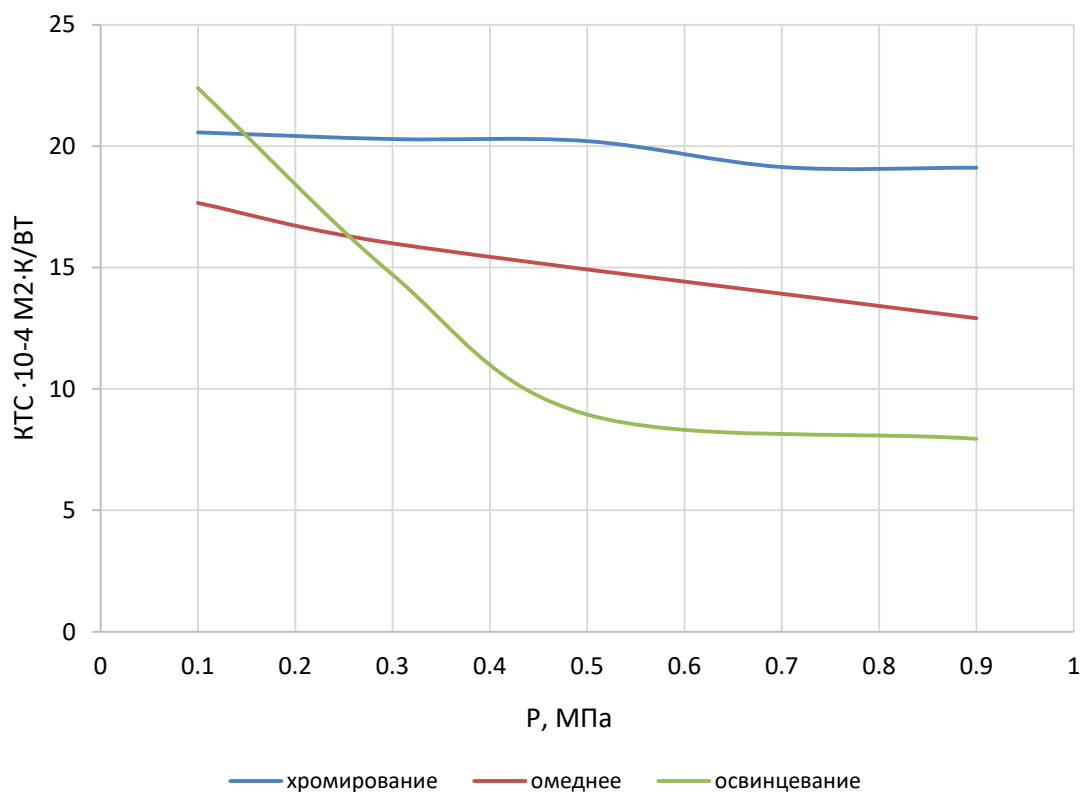


Рис. 6.78. Сравнительный анализ КТС с использованием в качестве напыления хрома, меди и свинца

Анализ графических зависимостей показал, что освинцевание при давлении сжатия начиная с 0,3 МПа более интенсивней снижает величину КТС по сравнению с наполнениями из меди и хрома.

### 6.10. Влияние циклической нагрузки на контактный теплообмен

Влияние циклической нагрузки на контактный теплообмен является весьма актуальной задачей в ряде вопросов инженерной техники. [396-412] В исследовании [396] рассматривалось влияние циклов нагружения на изменение тепловой проводимости контакта (см. рис. 6.79, 6.80). Явный эффект гистерезиса наблюдался только после первого цикла для двух разных пар материалов. Эффект гистерезиса был связан с различными режимами деформации во время первого нагружения и разгрузки.

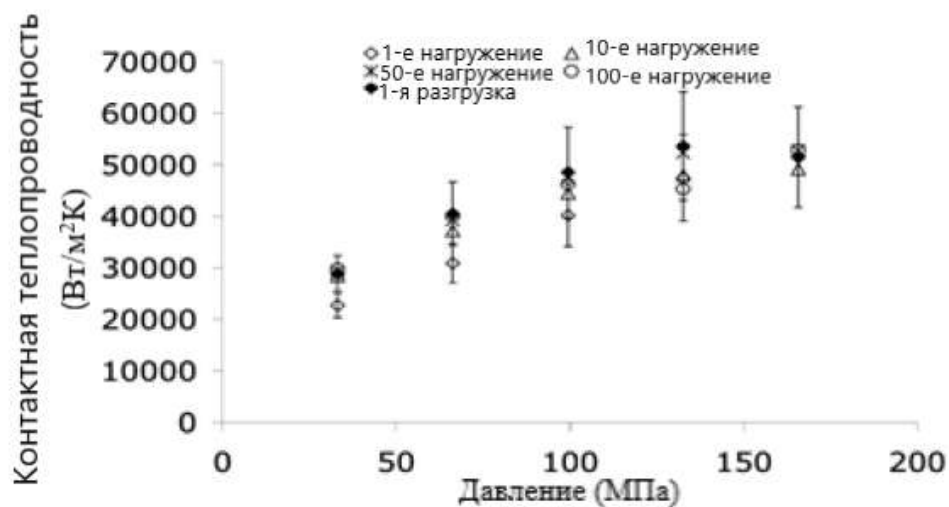


Рис. 6.79. Зависимость контактной теплопроводности от величины давления для циклов нагружения (Д16). [396]

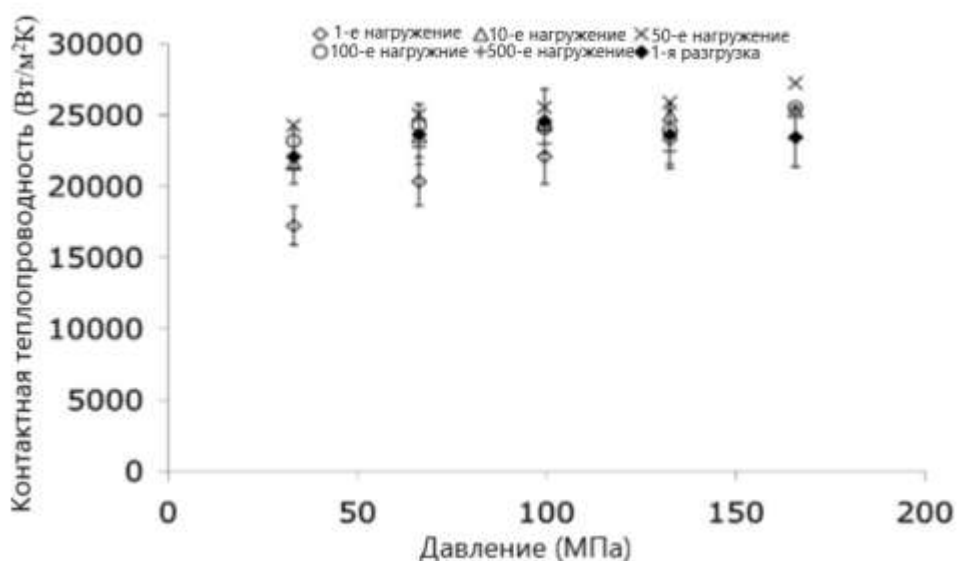


Рис. 6.80. Зависимость контактной теплопроводности от величины давления для циклов нагружения (12X18H9T). [396]

Эффект гистерезиса более выражен для несоответствующих друг другу поверхностей образцов по сравнению с гладкими поверхностями. Дальнейшего увеличения контактной теплопроводности после первого цикла

нагрузки/разгрузки отмечено не было. Также выявлено, что цикл нагружения зависит от пластичности материала, так как эффект увеличения теплопроводности при первых циклах более выражен для образца из алюминия.

В работе [397] представлены экспериментальные результаты влияния циклической нагрузки на общее сопротивление сборки, состоящей из графитовой биполярной пластины обработанной и необработанной газодиффузионными слоями. Циклические нагружения значительно снижают общее контактное термическое сопротивление рассматриваемой сборки (см. рис. 6.81).

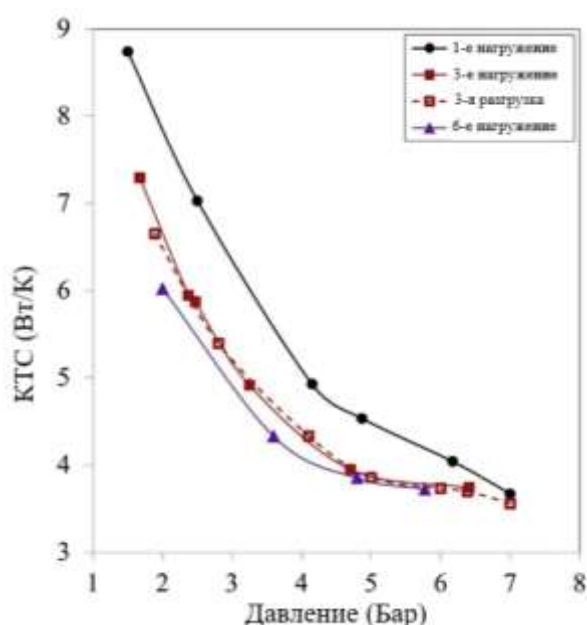


Рис. 6.81. Значение КТС в зависимости от величины давления для нескольких циклов нагружения. [397]

В работе [398] представлены экспериментальные зависимости для материалов разного рода при наличии термических циклических нагрузок при низких температурах. Дается оценка значения эффекта гистерезиса.

Эффект гистерезиса больше проявляется для соединений из алюминиевого сплава, так как алюминий имеет низкую твердость и высокую теплопроводность, в отличие от сплавов из титана (см. рис. 6.82). При приложении более высоких нагрузок алюминиевый сплав деформируется, что увеличивает адгезию

поверхностей, следовательно, значение тепловой проводимости контакта при втором цикле увеличивается.

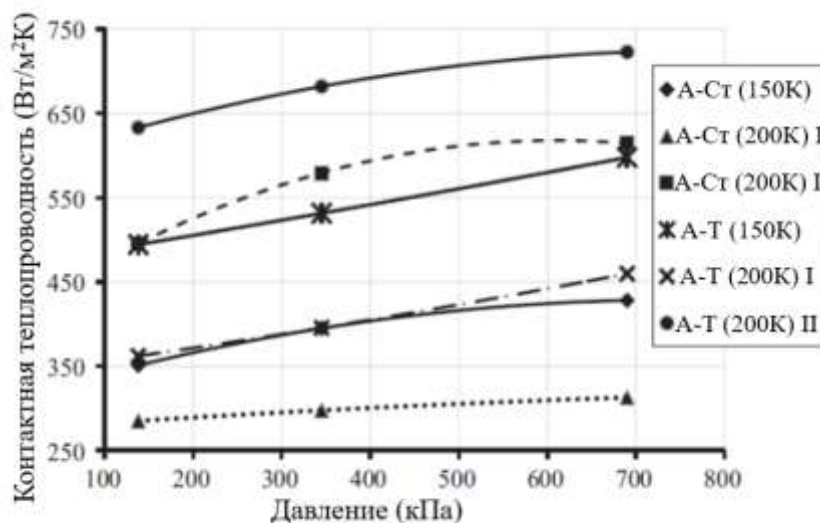


Рис. 6.82. Зависимость контактной теплопроводности от приложенной нагрузки. (А – сплав алюминия, Ст – 08Х18Н9Т, Т – ТС4; I – первый цикл нагружения, II – второй цикл нагружения при 200К) [398]

Авторы работы [399] приводят экспериментальное исследование, показывающее, что при наличии криогенных температур тепловая проводимость контакта меньше подвержена эффекту гистерезиса в отличие от температуры окружающей среды (см. рис. 6.83, 6.84).

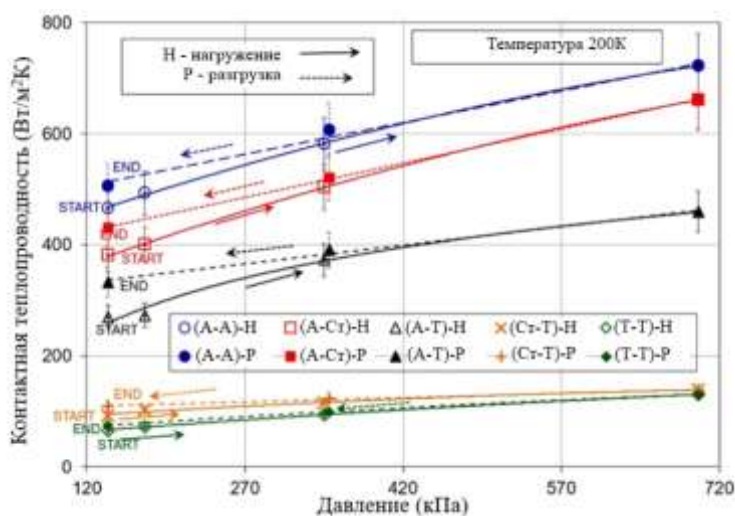


Рис. 6.83. Зависимость контактной теплопроводности от величины давления при цикле загрузки и разгрузки [399] (для пар материалов: А – сплав алюминия, Ст – 08Х18Н9Т, Т – ТС4)

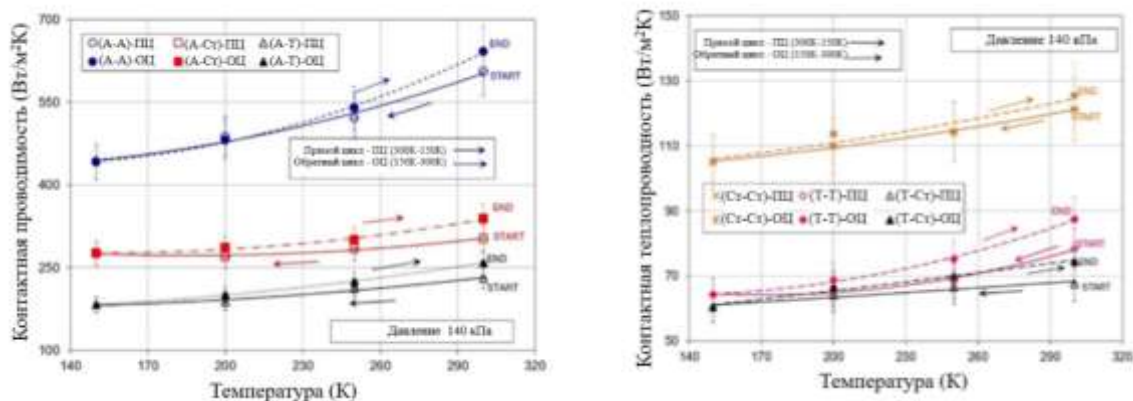


Рис. 6.84. Зависимость контактной теплопроводности от величины температуры при цикле нагревания и охлаждения [399] (для пар материалов: А – сплав алюминия, Ст – 08Х18Н9Т, Т – ТС4)

Цикл термического нагружения при криогенной температуре оказывает влияние на тепловую проводимость контакта и вызывает гистерезис в штампованных металлических соединениях. Установлено, что величина гистерезиса зависит от твердости соединяемых материалов. Гистерезис около 3-12 % в контактной теплопроводности наблюдается во всех соединениях в результате цикла термического нагружения с незначительно более высоким эффектом для соединений с алюминиевым сплавом (рис. 6.84). Эффект гистерезиса в результате цикла механического нагружения при криогенной температуре составляет от 9 % до 23 % (рис. 6.83), что ниже по сравнению с аналогичными соединениями при температуре окружающей среды. Замечено, что как термические, так и механические циклы нагружения вызывают гистерезис при криогенной температуре. Однако его влияние при криогенной температуре можно рассматривать с учетом погрешности 8,7 %.

В работе [411] представлены результаты показывающие, что улучшение контактной проводимости может быть достигнуто путем многократного нагружения и разгрузки соединений из нержавеющей стали.

Хотя каждый процесс разгрузки улучшает проводимость (рис. 6.85), очевидно, что первый процесс разгрузки дает наибольшее увеличение контактной проводимости (14,91%). Несмотря на то, что циклическое нагружение

увеличивает тепловую контактную проводимость, эффект довольно мал (рис. 6.86).

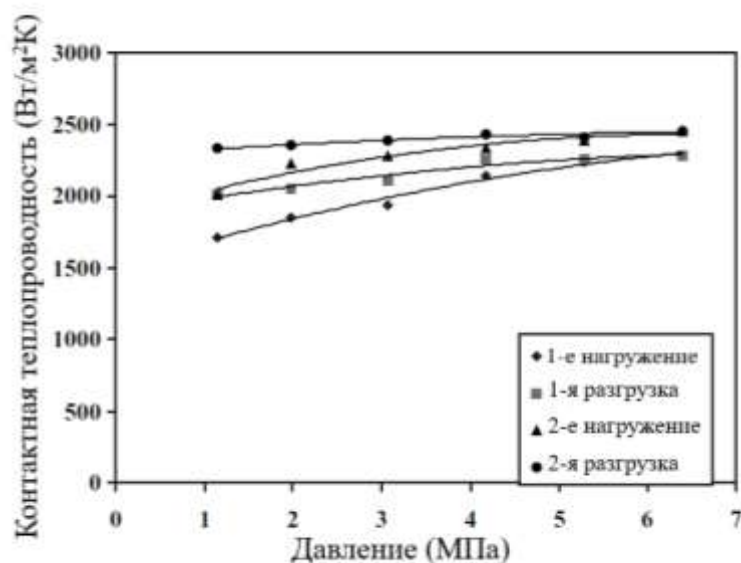


Рис. 6.85. Зависимость контактной проводимости от величины давления для двух циклов нагружения-разгрузки образцов из нержавеющей стали. [411]

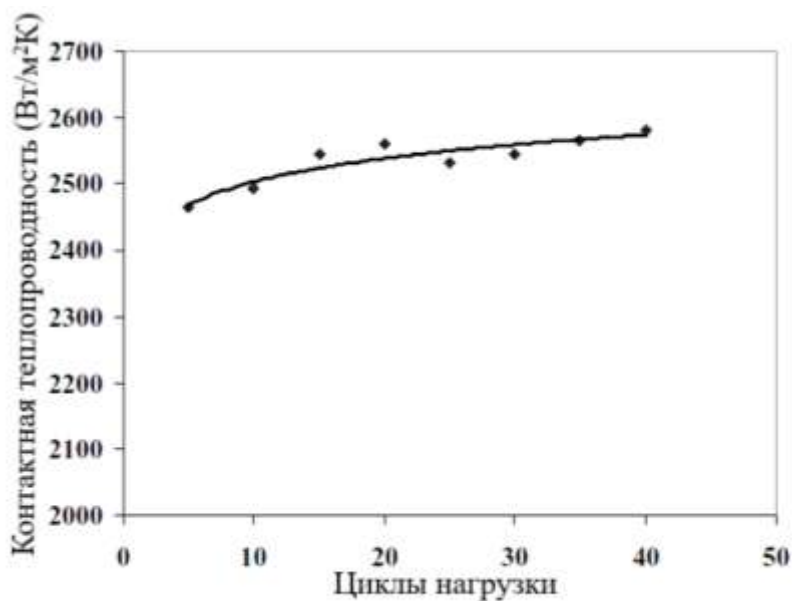


Рис. 6.86. Зависимость контактной теплопроводности в зависимости от цикла нагружения. [411]

Параметры микрорельефа поверхности играют определяющую роль в широком спектре физических процессов: от фрикционного взаимодействия деталей и гидрогазодинамики в каналах до формирования тепловых и напряжённо-деформированных полей в конструкциях. В современном

машиностроении, особенно при проектировании изделий с жёсткими требованиями к тепловому режиму [413, 414], именно обеспечение эффективного отвода или аккумуляции тепла зачастую становится ключевым критерием. Транзитные тепловые потоки, проходящие через изделие, а также внутренние источники теплоты должны быть либо рассеяны во внешнюю среду, либо временно накоплены — и направление этих потоков в значительной мере диктуется конструктивной геометрией, включая особенности контактных соединений. Следовательно, достоверная оценка параметров контактного взаимодействия — не просто вспомогательная задача, а фундамент для корректного анализа как теплового, так и механического состояния широкого класса технических систем [309, 310].

Эксплуатационные характеристики контактирующих элементов — будь то износостойкость, теплопроводность, электропроводность или жёсткость — напрямую зависят от свойств сопряжённых поверхностей. При решении задач теплового, механического и электрического контакта шероховатость поверхности выступает в роли доминирующего фактора. Именно на фактической площади контакта (а не на номинальной) реализуются процессы трения, износа, адгезии и переноса энергии. При этом локальное давление на микровыступах определяет разрушение оксидных и загрязняющих плёнок, что напрямую влияет на возникновение адгезионных связей и, как следствие, на коэффициент трения и интенсивность изнашивания.

Ключевыми характеристиками, определяющими контактную жёсткость, термо- и электросопротивление, являются сближение поверхностей (т.е. взаимное перемещение в нормальном направлении) и связанное с ним изменение реальной площади контакта. Именно в зонах фактического соприкосновения происходят перенос тепла и электрических зарядов, локальные пластические деформации, микросварка и разрушение поверхностных слоёв. Однако экспериментальное определение этих величин — площади контакта, степени сближения, объёма межконтактных зазоров и их проницаемости — остаётся чрезвычайно

трудоёмким и часто не даёт однозначной количественной картины из-за ограничений методов измерения и масштабных эффектов.

Одним из классических подходов к численному моделированию контакта является дискретизация реального профиля поверхности на совокупность элементарных «стержней» с заданной высотой и площадью основания. Такой подход формализует микрорельеф в виде числовой матрицы, где каждый элемент соответствует отдельной микронеровности [209]. Однако в подобных моделях, как правило, пренебрегают касательными взаимодействиями — силами трения между поверхностями, что ограничивает их применимость в задачах, где фрикционные эффекты существенны.

Важно подчеркнуть: адекватная оценка взаимодействия твёрдых тел возможна только при учёте реальной микротопографии, существенно отличающейся от идеализированных геометрических форм [209]. На практике микрорельеф чаще всего характеризуется по профильным параметрам [228], хотя, строго говоря, двумерный профиль не отражает полной трёхмерной картины шероховатости [230, 231]. Это создаёт серьёзные трудности при анализе контактных процессов. Наиболее перспективным решением является построение трёхмерной цифровой модели поверхности, максимально приближенной к реальной, с последующим использованием этой модели для расчёта контактных характеристик [233,234,236,415].

При расчётах контактного взаимодействия широко используются аналитические методы [182, 322], позволяющие быстро оценить основные параметры при однократном нагружении. Однако большинство таких моделей базируются на упрощающих допущениях, справедливых лишь в узких диапазонах условий. Учёт реального распределения высот микронеровностей обычно осуществляется либо через кривую опорной поверхности [311], либо с помощью статистических функций распределения [314, 416, 417]. Применение последних на практике затруднено необходимостью введения эмпирических коэффициентов, что снижает универсальность и точность расчётов.



Особую сложность представляет циклическое нагружение. В литературе практически отсутствуют аналитические модели, пригодные для инженерных расчётов в таких условиях. Имеющиеся данные носят преимущественно экспериментальный характер, но зачастую не сопровождаются полной информацией о микротопографии поверхностей, что делает невозможным их воспроизведение, верификацию или использование в расчётных схемах.

Выход из этой ситуации — применение современных информационных технологий [236], позволяющих обрабатывать большие массивы статистических данных о микрорельефе. Современные программно-аппаратные комплексы цифровой обработки изображений и профилометрии дают возможность создавать цифровые двойники поверхностей [8, 10] — виртуальные трёхмерные реплики, точно воспроизводящие как локальные особенности микрорельефа, так и его интегральные характеристики.

Цель настоящего раздела — апробировать методику использования цифровых двойников микрорельефа для моделирования эволюции контактных параметров при циклическом нагружении, а также определить предел качественного изменения реальной площади контакта в зависимости от числа циклов. Далее будет представлен пример применения данной методики к задаче контактного взаимодействия материалов с изотропными физико-механическими свойствами.

В работе проанализирована модель контакта двух поверхностей с шероховатостью поверхности с  $Ra = 0,82$  мкм и  $Ra = 2,07$  мкм (рис. 6.87, рис. 6.88).

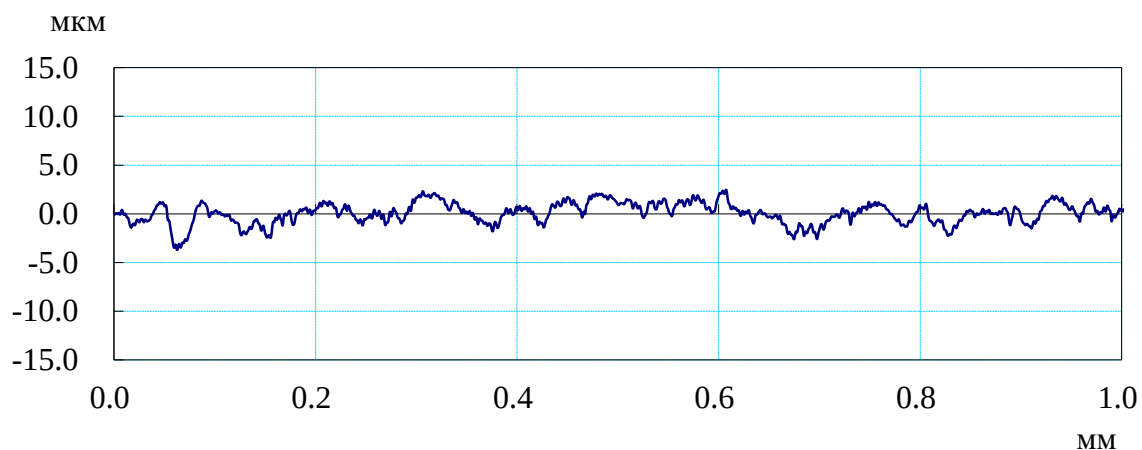


Рис. 6.87. Профилограмма поверхности с  $Ra = 0,82$  мкм.

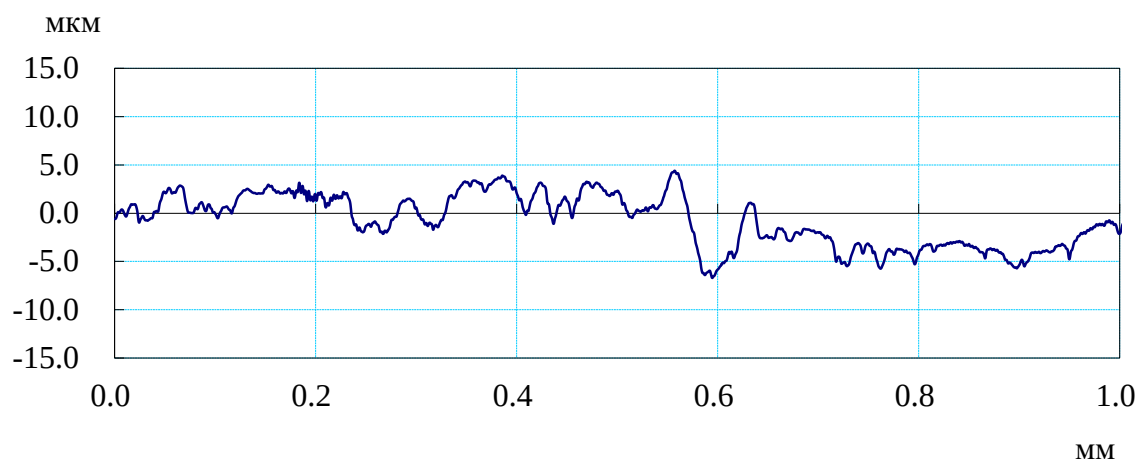


Рис. 6.88. Профилограмма поверхности с  $Ra = 2,07$  мкм.

Определение фактической площади контакта производилось по следующему алгоритму:

- задание граничных условий;
- определение величины перемещения верхнего, незафиксированного образца;
- модификация исходной геометрии по данным расчета;
- определение перемещения верхнего, незафиксированного образца и т.д.

Данный алгоритм повторялся до тех пор, пока разница в координате исследуемого образца в трех соседних расчетах становилась минимальным. Результаты величины перемещений представлены на рисунке 6.89.

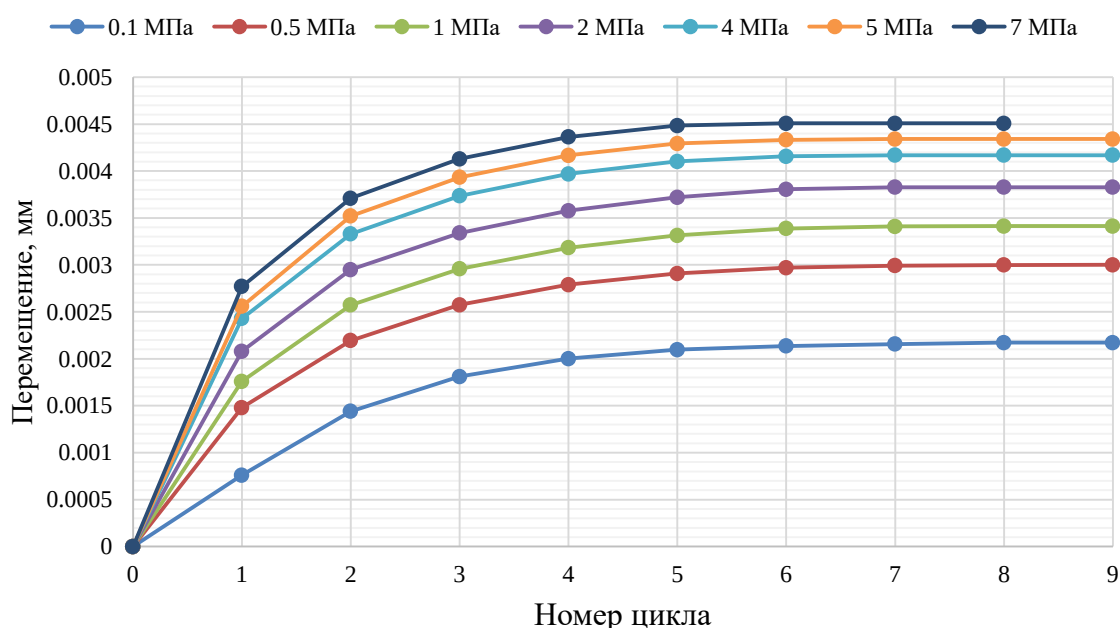


Рис. 6.89. Сводная диаграмма перемещений верхнего образца.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что перемещение исследуемого образца стабилизируется начиная с 6 цикла, что так же иллюстрируется изменением фактической площади контакта (табл. 6.13, табл. 6.14).

Табл. 6.13. Фактическая площадь контакта при циклической нагрузке (мм<sup>2</sup>)

| Сжимающая нагрузка | № цикла |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 1       | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| 0,1 МПа            | 0,0002  | 0,0005 | 0,0010 | 0,0012 | 0,0014 | 0,0015 | 0,0016 | 0,0017 | 0,0017 |
| 0,5 МПа            | 0,0005  | 0,0018 | 0,0030 | 0,0042 | 0,0051 | 0,0054 | 0,0056 | 0,0057 | 0,0057 |
| 1 МПа              | 0,0009  | 0,0030 | 0,0053 | 0,0076 | 0,0092 | 0,0102 | 0,0107 | 0,0107 | 0,0107 |
| 2 МПа              | 0,0015  | 0,0055 | 0,0099 | 0,0136 | 0,0172 | 0,0188 | 0,0204 | 0,0204 | 0,0204 |
| 4 МПа              | 0,0025  | 0,0096 | 0,0177 | 0,0245 | 0,0289 | 0,0320 | 0,0325 | 0,0325 | 0,0325 |
| 5 МПа              | 0,0031  | 0,0125 | 0,0234 | 0,0325 | 0,0384 | 0,0407 | 0,0413 | 0,0413 | 0,0413 |
| 7 МПа              | 0,0041  | 0,0170 | 0,0308 | 0,0425 | 0,0504 | 0,0526 | 0,0526 | 0,0526 | 0,0526 |

Табл. 6.14. Процентная доля фактической площади контакта от номинальной при циклической нагрузке

| Сжимающая нагрузка | № цикла |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 1       | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 0,1 МПа            | 0,005   | 0,013 | 0,027 | 0,035 | 0,040 | 0,043 | 0,045 | 0,048 | 0,048 |
| 0,5 МПа            | 0,014   | 0,049 | 0,084 | 0,118 | 0,143 | 0,151 | 0,156 | 0,159 | 0,159 |
| 1 МПа              | 0,025   | 0,085 | 0,148 | 0,211 | 0,257 | 0,284 | 0,298 | 0,298 | 0,298 |
| 2 МПа              | 0,041   | 0,154 | 0,274 | 0,377 | 0,480 | 0,524 | 0,567 | 0,567 | 0,567 |
| 4 МПа              | 0,068   | 0,268 | 0,492 | 0,681 | 0,804 | 0,889 | 0,903 | 0,903 | 0,903 |
| 5 МПа              | 0,085   | 0,348 | 0,652 | 0,903 | 1,068 | 1,131 | 1,150 | 1,150 | 1,150 |
| 7 МПа              | 0,115   | 0,472 | 0,855 | 1,181 | 1,401 | 1,464 | 1,464 | 1,464 | 1,464 |

Иллюстрация фактической площади контактов, образующихся при первоначальном нагружении при разных начальных сжимающих давлениях, а также при последующих циклах, представлены на рисунках 6.90 и 6.91 соответственно. Сравнение полученных изображений с результатами исследований микрорельефа поверхности с помощью оптической и растровой электронной микроскопии авторами [418], наглядно свидетельствуют о том, что картина формирования пятен контакта цифрового двойника контакта двух поверхностей, а также их характер распределения по поверхности близки к реальной картине.

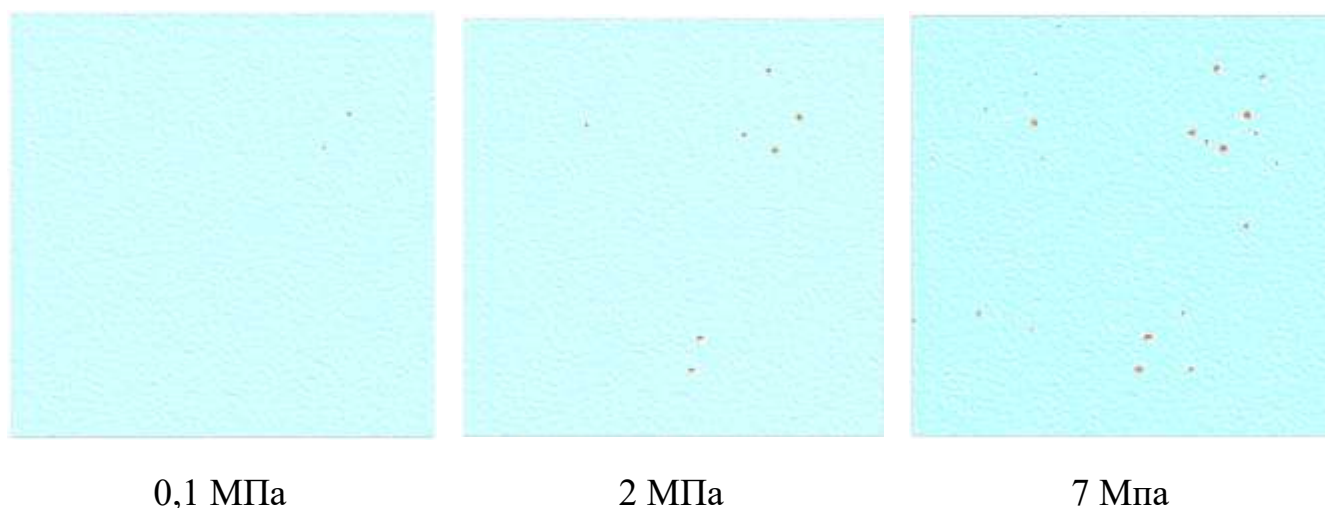
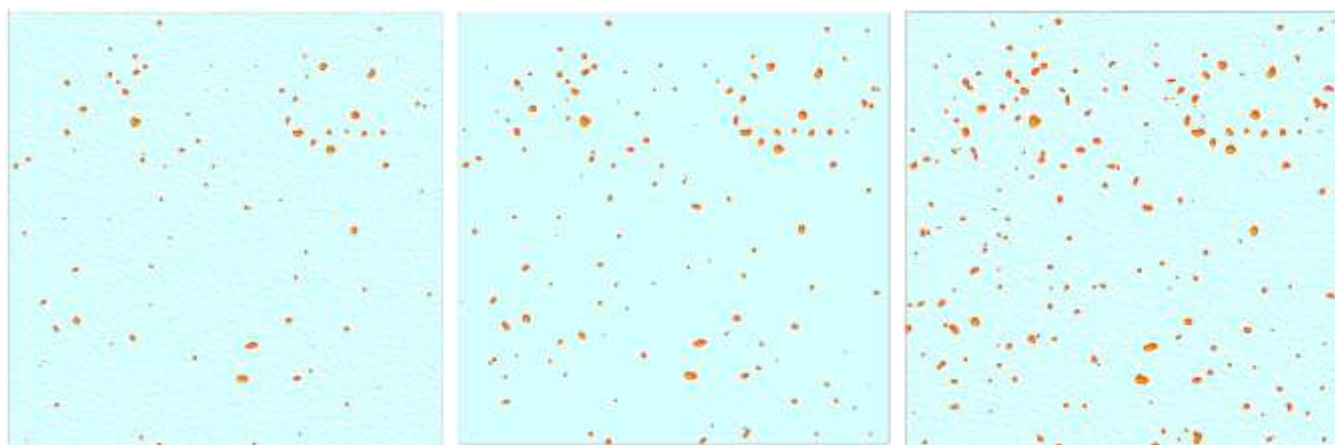


Рис. 6.90. Динамика формирования фактической площади контакта на поверхности с  $R_a = 0,82$  мкм при первоначальном нагружении 0,1 – 2 – 7 МПа.



Второй цикл

Третий цикл

Восьмой цикл

Рис. 6.91. Расположение фактических площадей контакта на поверхности с шероховатостью  $Ra = 0,82$  мкм при 2-м, 3-м, и 8-м цикле нагружения при сжимающей нагрузке 7 МПа.

Проведенные исследования циклического нагружения пар изотропных материалов на основе моделирования параметров рельефа поверхности показывают, что деформация микровыступов прекращается в среднем на пятом цикле нагружения, и относительные перемещения модельного образца сводятся к нулю. Можно так же утверждать, что в связи с тем, что задача контактного взаимодействия двух поверхностей решалась с помощью конечно-элементного анализа, в котором решается матричное уравнение жёсткости элемента, то разработанная методика может быть распространена на широкий круг контактирующих материалов.

### 6.11. Влияние низких температур контактирования

В качестве примера численного моделирования теплового контактирования твёрдых тел функционирующих в диапазоне криогенных температур на основе цифрового двойника соприкасающихся поверхностей воспользуемся результаты эксперимента авторов [419] для образцов, приведенных в таблице 6.15.

Таблица 6.15. Рассматриваемый образцы.

| Верхний образец |                        | Нижний образец |                        |
|-----------------|------------------------|----------------|------------------------|
| Материал        | Шероховатость<br>(мкм) | Материал       | Шероховатость<br>(мкм) |
| SS 304          | 5,43                   | SS 304         | 0,96                   |

На первом этапе методики выполняется построение геометрической модели контакта двух поверхностей с  $Ra = 5,43$  мкм и  $Ra = 0,96$  мкм (см. рис. 6.92). Геометрия поверхности создается по облаку точек микрорельефа определяемое по разработанной авторами методике [1-25], основная концепция которой заключается в использовании данных о геометрии микрорельефа и последующее их распределение по плоскости.



Рис. 6.92. 3-х мерная модель контакта пары  $Ra = 5,43$  мкм –  $Ra = 0,96$  мкм

Далее 3-х мерная модель контактной пары разбивается на конечные элементы, для получения расчетной сеточной модели. На рисунке 6.93 представлена конечно-элементная сеточная модель. Количество элементов сеточной модели 242335, узлов – 733540

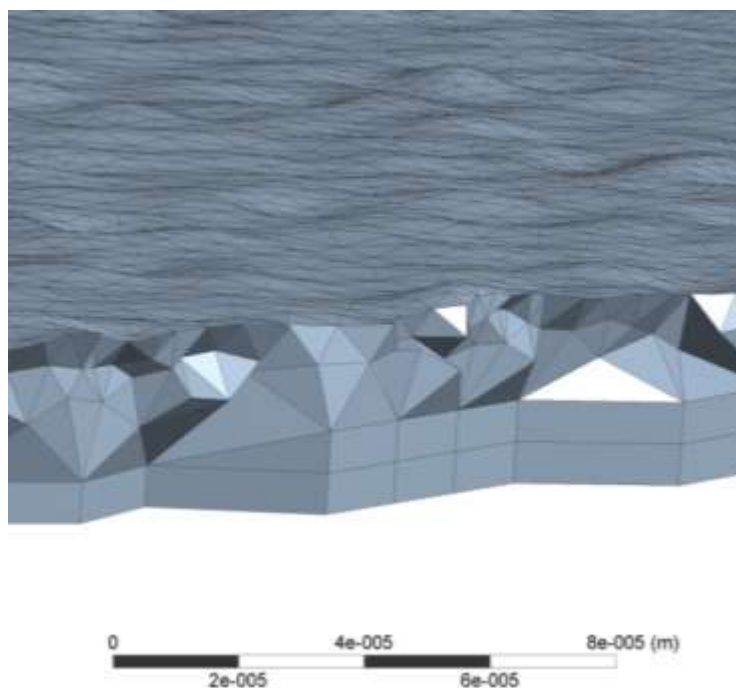


Рис. 6.93. Расчетная сеточная модель для  $Ra = 0,96$  мкм

В качестве начальных условий задачи механики деформируемого тела и теплового анализа использовались следующие граничные условия:

- Давление на верхний образец: 1, 3, 5, 7, 9 МПа;
- Температура тел: 130, 170 К;
- Тепловой поток: 600 Вт/м<sup>2</sup>;
- Температура окружающей среды: 195 К.
- Межконтактная среда: вакуум.
- Материал тел: SS 304 для первой и второй пары (см. табл. 6.16).

Таблица 6.16. Теплопроводность материала

| Т, К | Теплопроводность, Вт/м*К |
|------|--------------------------|
| 100  | 9,8                      |
| 150  | 10,88                    |
| 200  | 12,14                    |
| 250  | 12,97                    |

После задания граничных условий и решения системы дифференциальных уравнений матрицы жёсткости и теплопроводности итерационными методами, получены значения средних температур на контактных поверхностях, а также контактного термического сопротивления по формуле:

$$R_k = (T_n - T_o)/q,$$

где  $T_n$  и  $T_o$  – средняя температура на контактной поверхности нагреваемого и охлаждаемого образцов соответственно,  $q$  – тепловой поток ( $Вт/м^2$ ). Результаты расчёта приведены в таблице 6.17.

Таблица 6.17. Результаты теплового расчета с учётом температурных зависимостей теплофизических свойств материалов в области низких температур.

| Нагрузка, МПа | $T_n$ , К | $T_o$ , К | КТС, $м^2 \cdot К / Вт \cdot 10^3$ |
|---------------|-----------|-----------|------------------------------------|
| 1             | 129,978   | 126,407   | 5,951                              |
| 3             | 129,991   | 128,220   | 2,952                              |
| 5             | 129,998   | 128,804   | 1,991                              |
| 7             | 129,999   | 128,936   | 1,771                              |
| 9             | 129,996   | 129,296   | 1,168                              |
| 1             | 169,978   | 166,444   | 5,890                              |
| 3             | 169,990   | 168,234   | 2,927                              |
| 5             | 169,998   | 168,813   | 1,975                              |
| 7             | 169,999   | 168,944   | 1,757                              |
| 9             | 169,996   | 169,303   | 1,156                              |

На рисунке 6.94 представлен график зависимости контактного термического сопротивления от нагрузки для контактной пары с  $R_a = 5,43$  мкм и  $R_a = 0,96$  мкм и график с величинами, взятыми из эксперимента, который проводил факультет энергетики Сианьского университета в Китае.



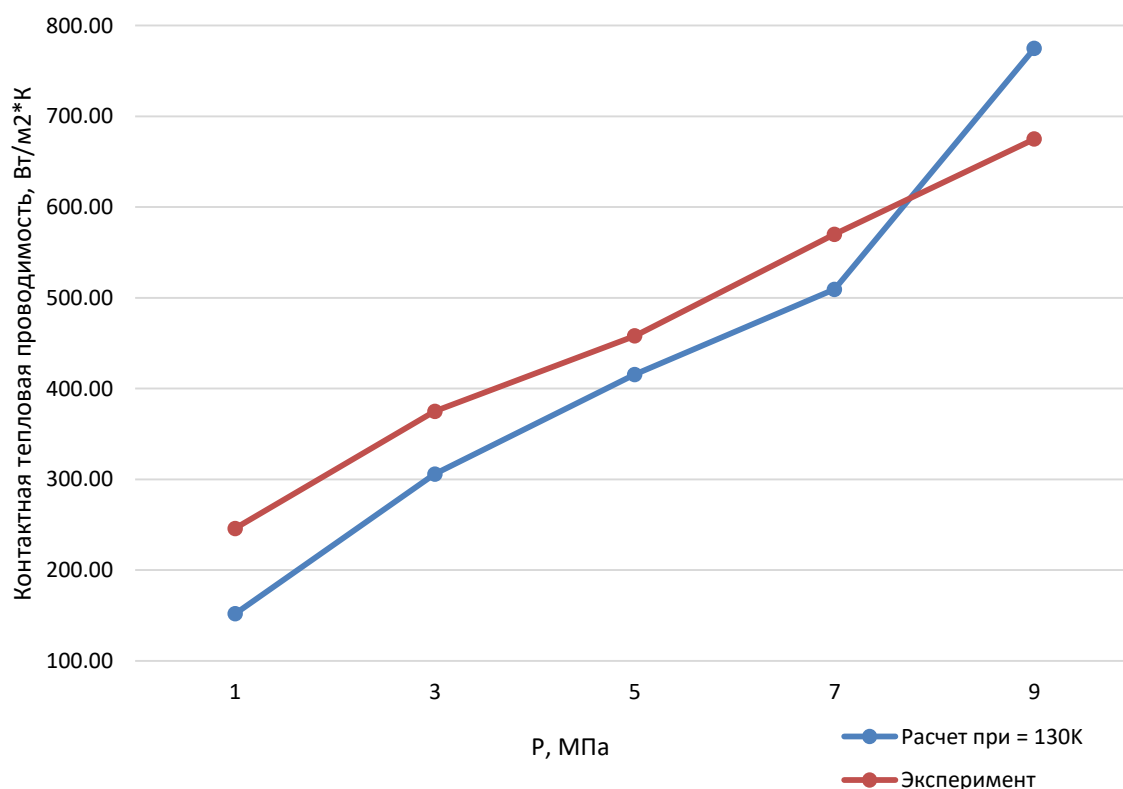


Рис. 6.94. График зависимости контактной тепловой проводимости от нагрузки для первой пары в низкотемпературной области.

При сравнении двух моделей можно сделать вывод, что данная методика позволяет без проведения эксперимента с небольшой погрешностью определить величину контактного термического сопротивления. На рисунке 6.95 показано поле распределения температур для первой контактной пары, при действующей температуре 130 К.

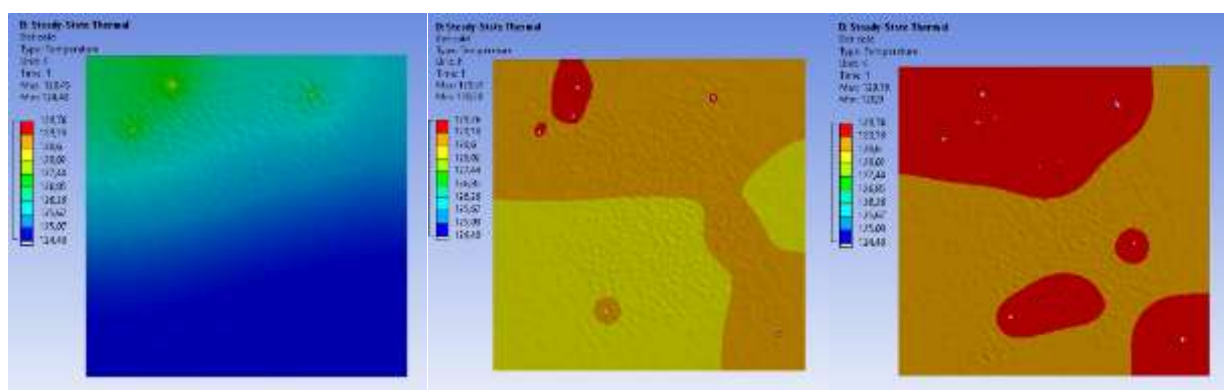


Рис. 6.95. Распределение температурного поля на поверхности  $R_a = 0,96$  мкм. Нагрузка 1, 5, 9 МПа. Температура 130К

На рисунке 6.96 показано поле распределения температур для первой контактной пары, при действующей температуре 170 К.

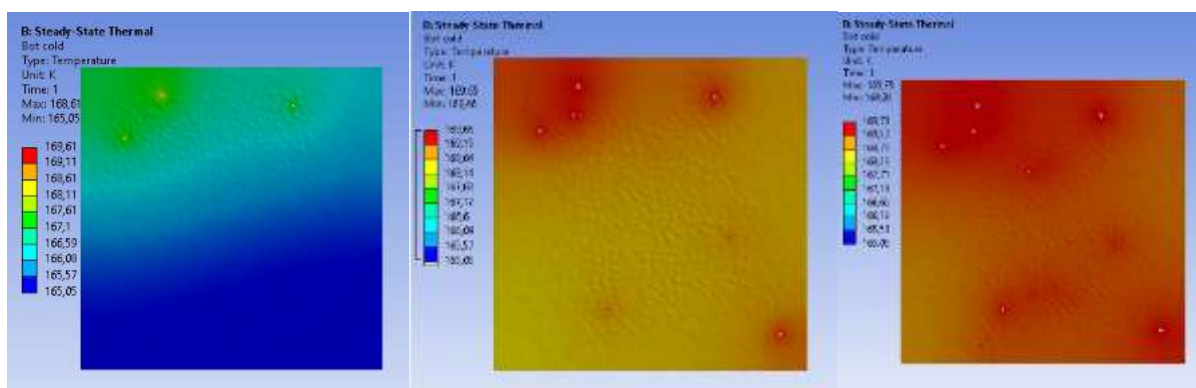


Рис. 6.96. Распределение температурного поля на поверхности  $Ra = 0,96$  мкм.

Нагрузка 1, 5, 9 МПа. Температура 170К.

Исходя из рисунков 6.94 – 6.96 можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки, нижняя пластина прогревается более равномерно, так как уменьшается величина контактного термического сопротивления. Сравнение расчётов с экспериментом даёт основание полагать, что используемая методика определения контактного термического сопротивления может быть применима для определения тепловой проводимости пар материалов, работающих при низких температурах.

## 6.12. Влияние анизотропии свойств материала на контактный теплообмен

Начальным этапом расчета является задание свойств материала. Исследовался контакт стального образца X18H10T с композитом на основе волокон UMT49 и связующего PN-3M.

Сама идеология композиционного материала базируется на том принципе, что конструктор или технолог может варьировать механические свойства материала в любом выбранном направлении.

Прочность материала напрямую зависит от взаимной ориентации волокон в пространстве. Фактором, определяющим свойства, часто становится доля

однонаправленных (прямых натянутых) волокон, присутствующих в данном материале и ориентированных вдоль приложенной нагрузки.

Между собой волокна в поперечном направлении композита связаны материалом матрицы, прочность которой на несколько порядков меньше прочности волокон вдоль своей длины.

Из заготовок вырезались экспериментальные образцы – «таблетки» во взаимно перпендикулярных направлениях – X, Y, Z, где X- направление укладки армирующего материала, Y-трансверсальное направление в плоскости слоя, Z- «третье» направление (по толщине образца).

В библиотеке стандартных материалов Engineering data ANSYS отсутствуют свойства керамоматричного анизотропного композита на основе армирующих волокон UMT 49S и связующего PN-3M и высокомодульных волокон Toray M46J.

Поэтому в библиотеку были добавлены недостающие свойства, представленные в таблице 6.18, 6.19.

Таблица 6.18 Свойства композитного материала: плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига.

| $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $E_x$ ,<br>МПа | $E_y$ ,<br>МПа | $E_z$ ,<br>МПа | $\nu_{xy}$ | $\nu_{yz}$ | $\nu_{xz}$ | $G_{xy}$ ,<br>МПа | $G_{yz}$ ,<br>МПа | $G_{xz}$ ,<br>МПа |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1590                          | 23700          | 82700          | 11610          | 0,307      | 0,518      | 0,307      | 5175              | 5175              | 3,095             |

Таблица 6.19 Свойства композитного материала, зависящие от температуры

| T, °C | $\lambda_x$ , Вт/(м*К) | $\lambda_y$ , Вт/(м*К) | $\lambda_z$ , Вт/(м*К) |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0     | 0,79                   | 27,75                  | 0,79                   |
| 50    | 0,87                   | 32,21                  | 0,88                   |
| 100   | 0,92                   | 35,64                  | 0,94                   |
| 150   | 0,99                   | 38,57                  | 0,99                   |
| 200   | 1,03                   | 39,89                  | 1,03                   |

|     |      |       |      |
|-----|------|-------|------|
| 250 | 1,05 | 40,14 | 1,05 |
| 300 | 1,04 | 39,52 | 1,06 |
| 350 | 1,04 | 39,7  | 1,08 |

Основные свойства материала второй детали из X18H10T, также отобразим в таблице 6.20.

Таблица 6.20. Свойства X18H10T

| T, °C | E, Па   | $\nu$ | G, Па     | $\lambda$ , Вт/(м*К) |
|-------|---------|-------|-----------|----------------------|
| 20    | 1,98e11 | 0,3   | 7,6154e10 | 15                   |
| 100   | 1,94e11 | 0,3   | 7,4615e10 | 16                   |
| 200   | 1,89e11 | 0,3   | 7,2592e10 | 18                   |
| 300   | 1,81e11 | 0,3   | 6,9615e10 | 20                   |
| 400   | 1,74e11 | 0,3   | 6,6923e10 | 21                   |
| 500   | 1,66e11 | 0,3   | 6,3846e10 | 23                   |
| 600   | 1,57e11 | 0,3   | 6,0385e10 | 25                   |
| 700   | 1,47e11 | 0,3   | 5,6538e10 | 26                   |
| 800   | 1,35e11 | 0,3   | 5,1923e10 | 28                   |

Для оценки влияния анизотропного материала на дальнейший расчет контактного термического сопротивления было создано три различных варианта укладки армирующего материала, с помощью блока Geometry.

- $[0]_n$
- $[0; +45; 0; -45]_n$
- $[90]_n$

Укладка типа  $[0]_n$  характеризует свойства единичного слоя. Она является паспортной характеристикой композиционного материала и может напрямую использоваться в «слоистых» моделях материала высокого уровня сложности. На первом этапе прочностного проектирования можно использовать более простые

модели описания композиционного материала, например, модель сплошного ортотропного тела, в котором свойства материала в макрообъёме усредняются по трём направлениям. Для улучшения методики определения теплового состояния, необходимо использовать в расчете свойства материала, отражающие его повышенную теплопроводность в «третьем направлении» рисунок 6.97.



Рисунок 6.97. Сухие заготовки образцов с укладкой  $[0;]_n$ , и  $[0;+45;0;-45]_n$

С помощью модуля геометрического моделирования Design Modeler реализовано различное направление армирующих волокон посредством вращения системы координат.

Блок Static Structural нацелен на нахождение смещения, деформации и напряжения в деталях, вызванных нагрузкой. контактов между двумя поверхностями. Для точности результатов необходимы грамотные настройки сетки, недостатки сетки очень сильно влияют на результаты расчета. Размеры сетки были выбраны исходя из нахождения идеального соотношения скорости и точности расчета. Наибольший интерес представляет область контакта. Использована функция сгущения сетки по контактируемым граням с 3 слоями, что позволяет более точно описать поведение контакта.

Сетка построена с помощью sweep-метода с треугольными элементами. Количество элементов сетки - 123876 , количество узлов – 396547.

После передачи сеточной модели в модуль расчета для нее были заданы граничные условия рисунок 6.98 следующего типа:

- Нагрузка А: к верхней границе приложено давление  $P$ , которое изменяется в диапазоне от 0,1 до 6 атм (см. рис. 6.99).
- Нагрузка В: к боковым границам образцов приложены граничные условия скользящей заделки без трения
- Нагрузка С: к нижней границе приложено граничное условие жесткой заделки

Программный комплекс мультидисциплинарного анализа ANSYS позволяет рассчитывать и визуализировать деформации и напряжения различных видов, описание которых представлено ниже:

- Equivalent (von Mines) Stress - эквивалентные напряжения
- Penetration - проникновение
- Position – положение деталей относительно системы координат

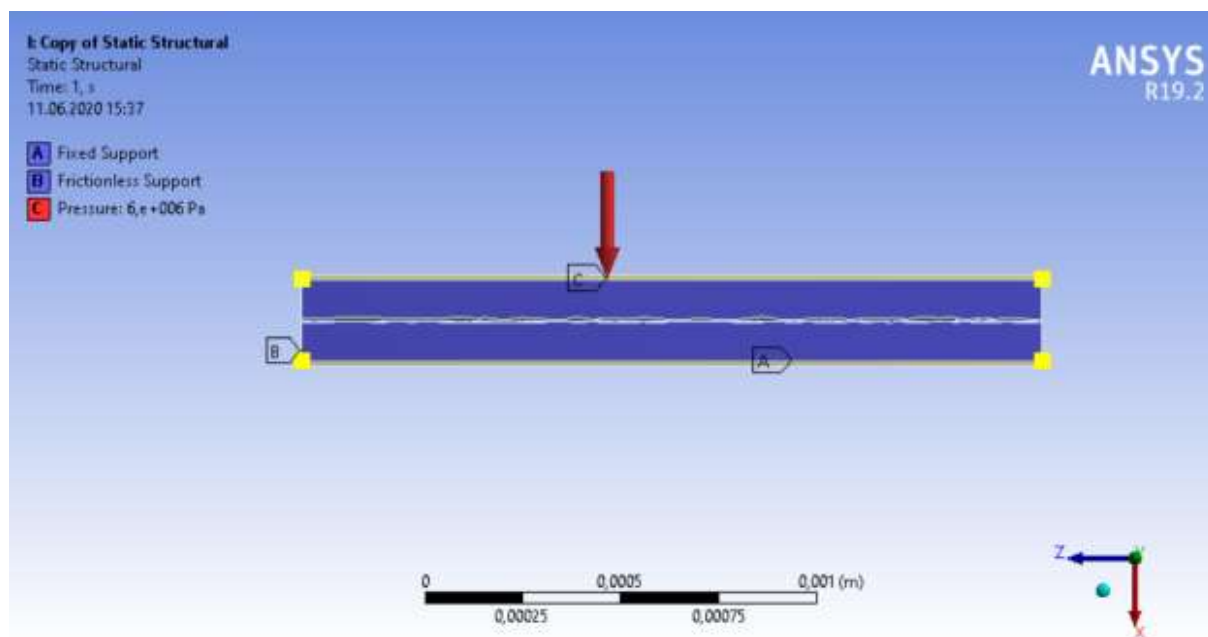


Рис. 6.98. Установка граничных условий.

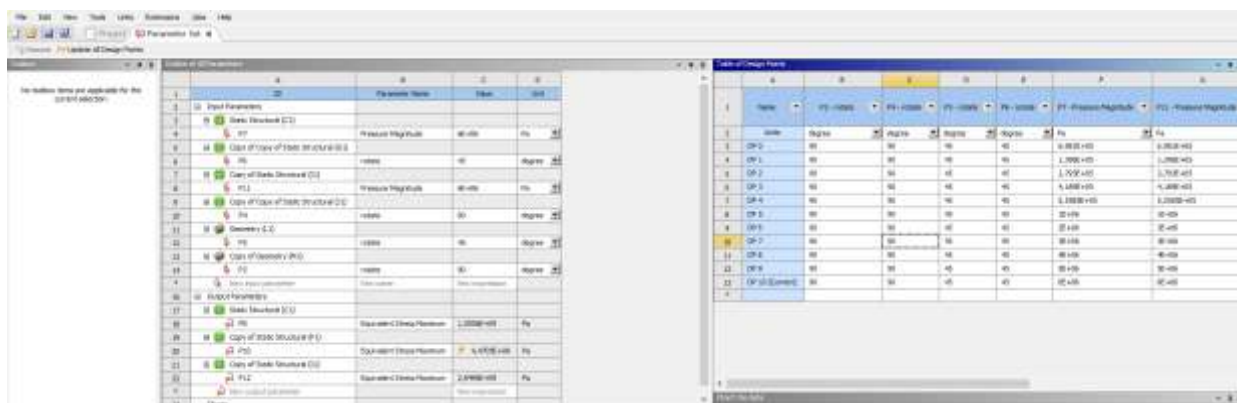


Рис. 6.99. Реализация расчета в среде Ansys для различных давлений и 3х углов армирования

Результат прочностного анализа является поле эквивалентных напряжений (см. рисунки 6.100, 6.101) и межконтактного давления, величина проникновения поверхности одной детали в поверхность другой детали.

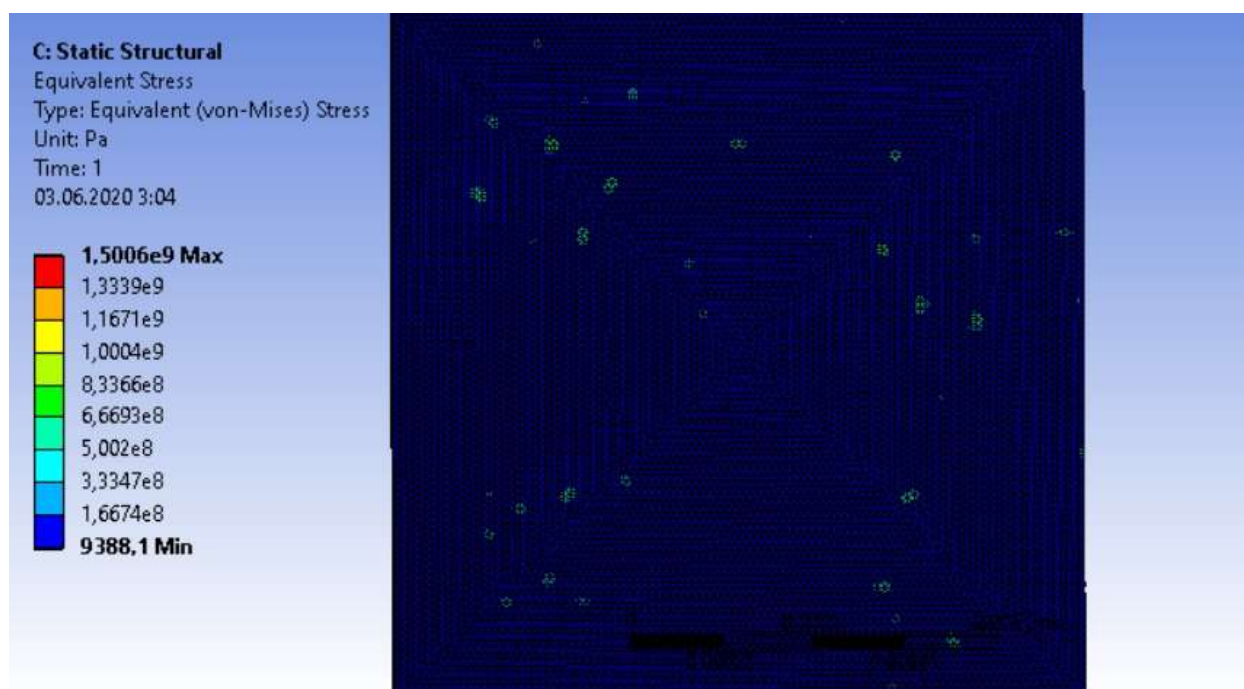


Рис. 6.100. Поле эквивалентных напряжений.



| P11 - Pressure Magnitude | P8 - Equivalent Stress Maximum | P10 - Equivalent Stress Maximum | P12 - Equivalent Stress Maximum | Ret...                              | Retained Data |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| Pa                       | Pa                             | Pa                              | Pa                              |                                     |               |
| 6,981E+05                | 5,8174E+08                     | 8,4422E+08                      | 9,7711E+08                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 1,396E+05                | 1,9871E+08                     | 2,9669E+08                      | 3,3883E+08                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 2,793E+05                | 3,2508E+08                     | 4,6472E+08                      | 5,4037E+08                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 4,189E+05                | 4,0551E+08                     | 6,0798E+08                      | 7,1152E+08                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 5,5585E+05               | 4,9455E+08                     | 7,2894E+08                      | 8,6263E+08                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 1E+06                    | 7,4712E+08                     | 1,1071E+09                      | 1,2221E+09                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 2E+06                    | 1,0616E+09                     | 1,8376E+09                      | 1,9123E+09                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 3E+06                    | 1,1887E+09                     | 2,2499E+09                      | 2,2171E+09                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 4E+06                    | 1,3496E+09                     | 2,4836E+09                      | 2,5578E+09                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 5E+06                    | 1,4164E+09                     | 2,7191E+09                      | 2,6839E+09                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
| 6E+06                    | 1,5006E+09                     | 2,9226E+09                      | 2,9496E+09                      | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |
|                          |                                |                                 |                                 | <input type="checkbox"/>            |               |

Рис. 6.101. Результаты прочностного расчета для 3х углов направления армирования КМК-МС

Для каждого значения давлений рассчитаны значения перемещения координаты верхней плоскости для нахождения величины проникновения поверхности детали в поверхность другой детали.

В зависимости от угла армирования были получены величины смещений, представленный в таблицах 6.21, 6.22 и 6.23, а также на рисунках 6.102, 6.103 и 6.104 соответственно.

Таблица 6.21. Смещение при угле армирования [0].

| P       | $z_0$ | $Z_{\max}(z_1)$ | $Z_{\min}(z_1)$ | $\Delta_{\max}$ | R      | Смещение |
|---------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|----------|
| МПа     | мм    | мм              | мм              | мкм             | мкм    | мкм      |
| 0,19871 | 0,105 | 0,10385         | 0,10453         | 0,26735         | 6,0393 | 1,41735  |
| 0,2793  |       | 0,10357         | 0,10437         | 0,30412         |        | 1,73412  |
| 0,4189  |       | 0,10339         | 0,10426         | 0,28841         |        | 1,89841  |
| 0,55585 |       | 0,10324         | 0,10418         | 0,32646         |        | 2,08646  |
| 0,6981  |       | 0,10313         | 0,10411         | 0,31978         |        | 2,18978  |
| 1       |       | 0,10292         | 0,10399         | 0,33992         |        | 2,41992  |



|   |  |         |         |         |  |         |
|---|--|---------|---------|---------|--|---------|
| 2 |  | 0,10249 | 0,10371 | 0,36345 |  | 2,87345 |
| 3 |  | 0,10224 | 0,10354 | 0,38518 |  | 3,14518 |
| 4 |  | 0,10206 | 0,10341 | 0,38531 |  | 3,32531 |
| 5 |  | 0,10191 | 0,10333 | 0,39091 |  | 3,48091 |
| 6 |  | 0,10179 | 0,10339 | 0,41957 |  | 3,60091 |

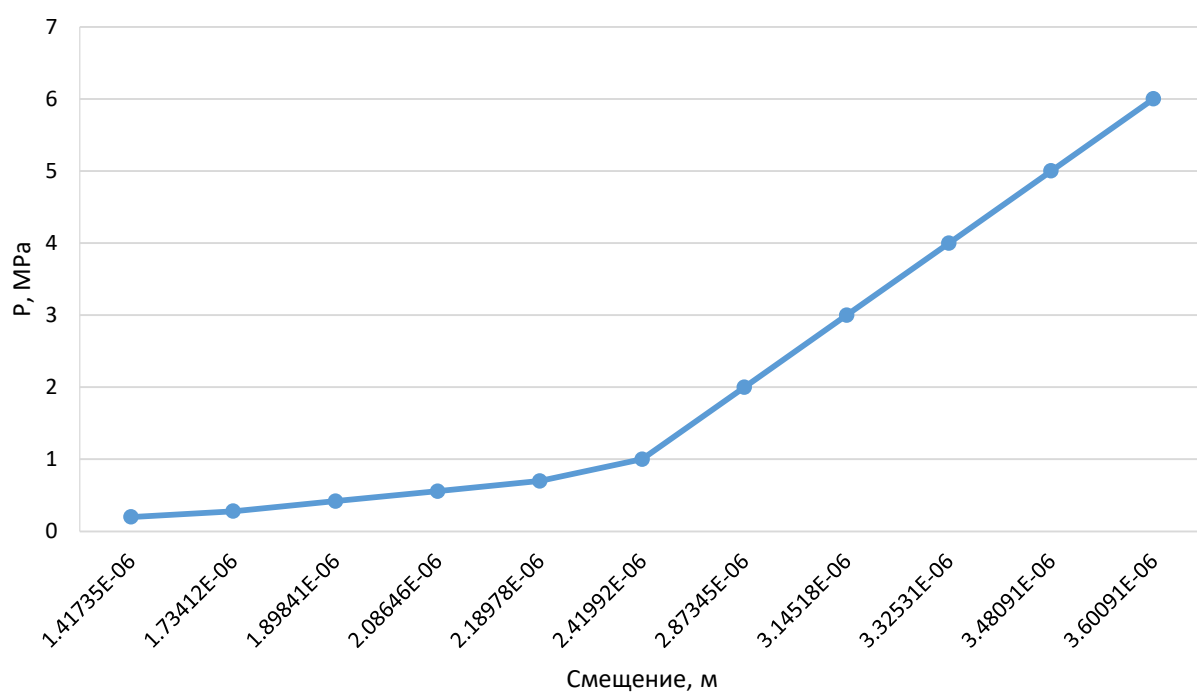


Рис. 6.102. Зависимость смещения от приложенного давления при угле армирования [0]

Таблица 6.22. Смещение при угле армирования [45].

| P       | $z_0$ | $Z_{\max}(z_1)$ | $Z_{\min}(z_1)$ | $\Delta_{\max}$ | R   | Смещение |
|---------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|----------|
| МПа     | мм    | мм              | мм              | мкм             | мкм | мкм      |
| 0,19871 |       | 0,64684         | 0,64637         | 0,22302         |     | 1,033    |
| 0,2793  |       | 0,64695         | 0,64642         | 0,27383         |     | 1,1938   |
| 0,4189  |       | 0,64708         | 0,64649         | 0,32932         |     | 1,3793   |
| 0,55585 |       | 0,64717         | 0,64654         | 0,31238         |     | 1,4524   |
| 0,6981  |       | 0,64726         | 0,64659         | 0,32901         |     | 1,559    |

|   |       |         |         |         |        |        |
|---|-------|---------|---------|---------|--------|--------|
| 1 | 0,646 | 0,64739 | 0,64666 | 0,33856 | 6,0393 | 1,6986 |
| 2 |       | 0,6477  | 0,64685 | 0,36989 |        | 2,0399 |
| 3 |       | 0,64787 | 0,64697 | 0,39327 |        | 2,2333 |
| 4 |       | 0,648   | 0,64705 | 0,39089 |        | 2,3609 |
| 5 |       | 0,6481  | 0,64711 | 0,385   |        | 2,455  |
| 6 |       | 0,64897 | 0,64732 | 0,39185 |        | 2,5571 |

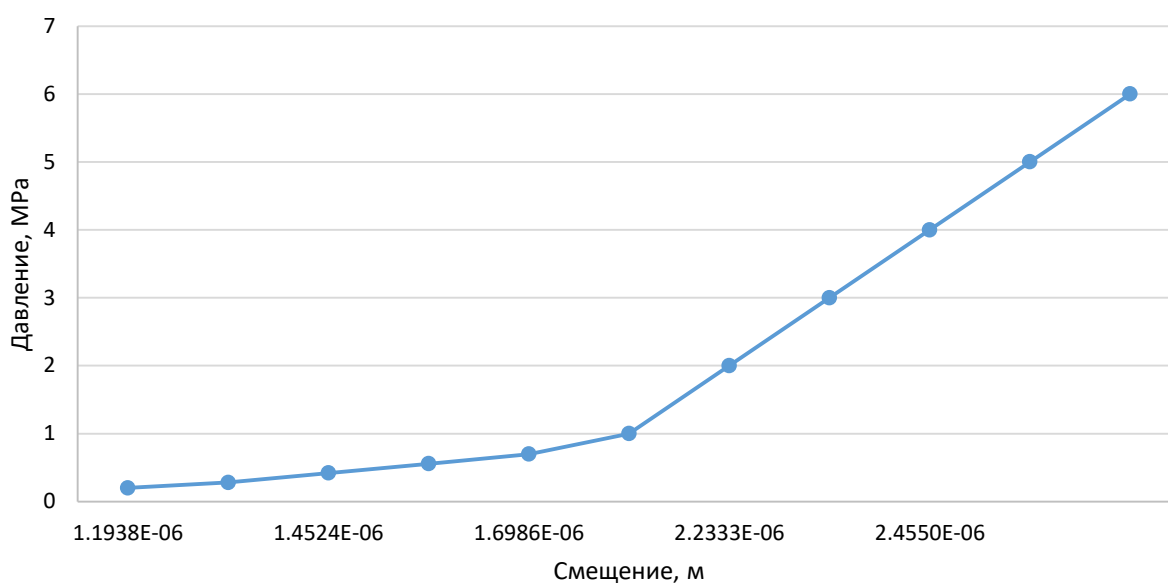


Рис. 6.103. Зависимость смещения от приложенного давления при угле армирования [45]

Таблица 6.23. Смещение при угле армирования [90].

| Р       | $z_0$ | $Z_{\max}(z_1)$ | $Z_{\min}(z_1)$ | $\Delta_{\max}$ | R      | Смещение |
|---------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|----------|
| МПа     | мм    | мм              | мм              | мкм             | мкм    | мкм      |
| 0,19871 | 0,105 | 0,10408         | 0,10464         | 0,15205         | 6,0393 | 1,0721   |
| 0,2793  |       | 0,10396         | 0,10455         | 0,18036         |        | 1,2206   |
| 0,4189  |       | 0,10378         | 0,104468        | 0,24507         |        | 1,4638   |
| 0,55585 |       | 0,10366         | 0,10441         | 0,28604         |        | 1,6261   |
| 0,6981  |       | 0,10356         | 0,10435         | 0,29278         |        | 1,7363   |
| 1       |       | 0,1034          | 0,10426         | 0,29021         |        | 1,8935   |
| 2       |       | 0,10304         | 0,10407         | 0,33184         |        | 2,2898   |

|   |         |         |         |        |
|---|---------|---------|---------|--------|
| 3 | 0,1028  | 0,10392 | 0,32692 | 2,531  |
| 4 | 0,10262 | 0,1038  | 0,34539 | 2,7223 |
| 5 | 0,10249 | 0,10371 | 0,3373  | 2,8522 |
| 6 | 0,10237 | 0,10363 | 0,36993 | 2,9999 |

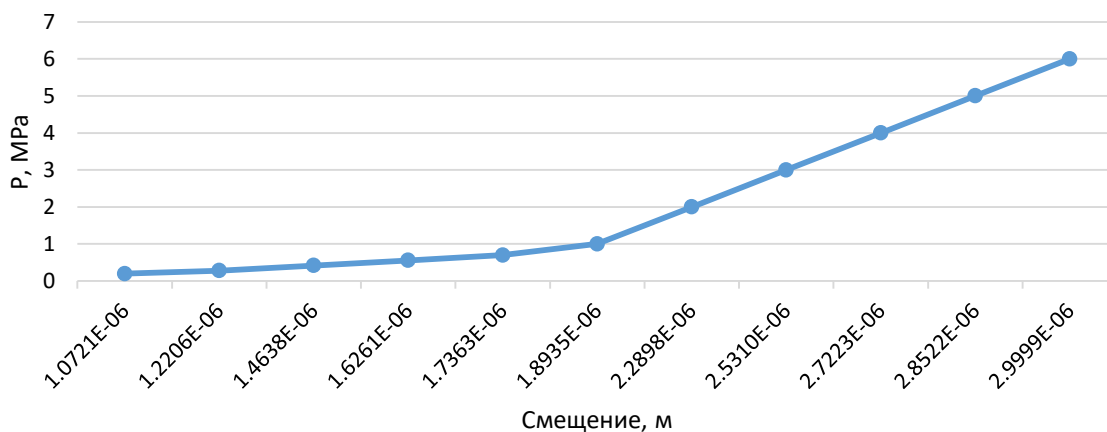


Рис. 6.104. Зависимость смещения от приложенного давления при угле армирования [90]

На рисунке 6.105 представлен график для сравнения зависимости смещения от приложенного давления с учетом трех углов армирования композитного материала. Как видно из общего графика зависимости величины смещения от приложенного давления – наименьшее смещение соответствует углу армирования равному 45.

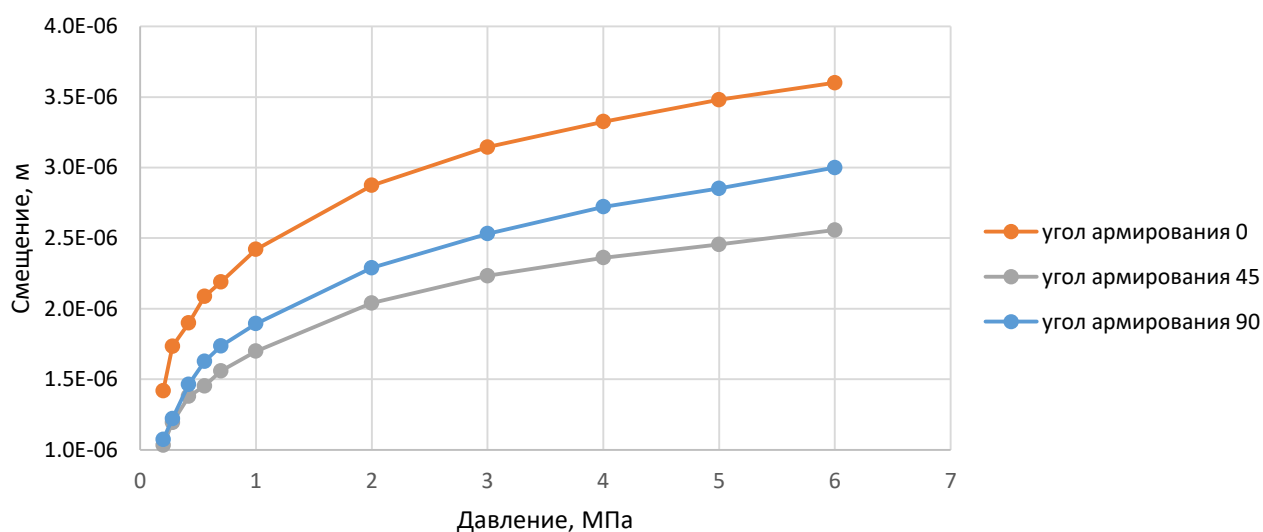


Рис. 6.105. Зависимость смещения от приложенного давления при 3-х углах армирования.

Основной проблемой при расчетах конструкций является недопущение их разрушения, поэтому особое внимание приобретает проблема длительной прочности металлов, из которых изготовлены конструкции. Поэтому на рисунке 6.106 представлена зависимость эквивалентных напряжений от приложенного давления.

Эквивалентное напряжение ( $\sigma$ ) – это напряжение, под действием которого материал в условиях простого растяжения-сжатия оказывается в равноопасном состоянии с рассматриваемым сложным напряженным состоянием.

Согласно первой теории прочности опасное состояние материала при сложном напряженном состоянии наступает тогда, когда наибольшее по модулю главное напряжений достигает предельного значения для заданного материала при простом растяжении (сжатии).

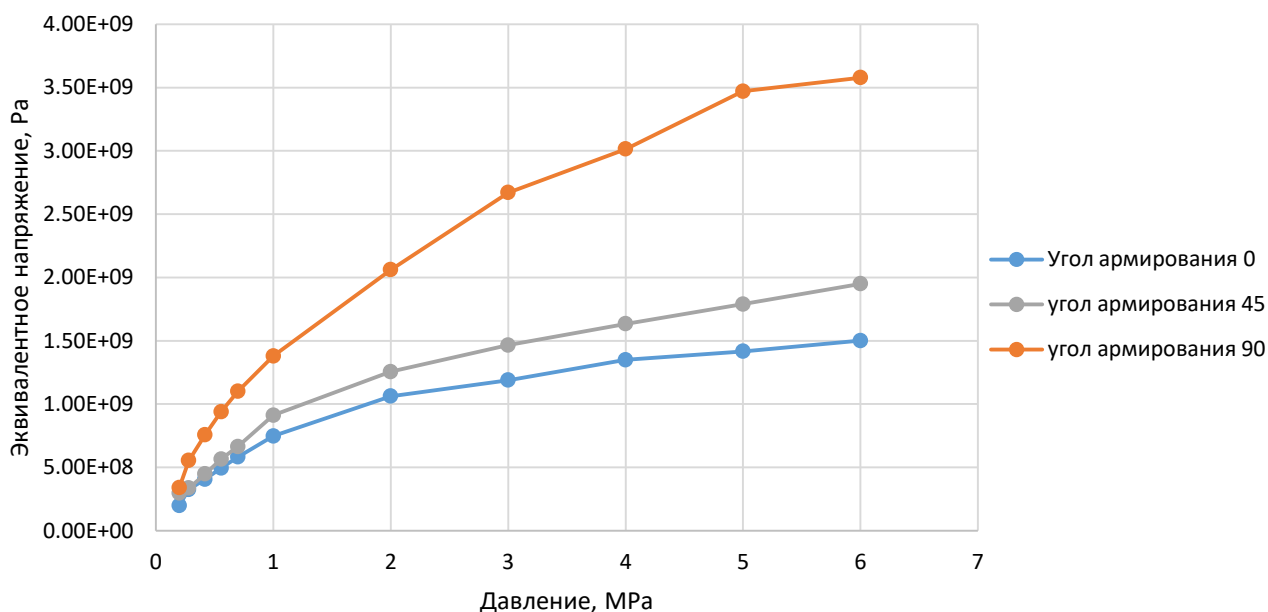


Рис. 6.106. Зависимость смещения от приложенного давления в сравнении для 3-х углов армирования

На этом шаге первый под этап моделирования заканчивается. Получено среднее значение смещения поверхности в зависимости от давления, что необходимо на следующем этапе – моделировании контактного теплообмена.

Для определения КТС создадим трехмерную модель, которая будет описывать реальную поверхность с учетом ее микрогеометрии. Моделирование по всему объему конструкции потребует больших компьютерных мощностей для расчета, поэтому воспользуемся допущением, что контакт имеет одинаковый характер по всему радиусу контакта. Это позволит взять в качестве модели настолько маленький объем контактирующих поверхностей, что они примут вид двух пластин, которые показаны на рисунках выше.

На предыдущем шаге были получены значения давлений при контакте и величина смещения. Воспользовавшись полученными данными, возможно смоделировать давление для увеличения фактической площади контакта. Такой метод позволит не нагружать модель прочностной задачей, что значительно сократит время расчета, что для большого количества моделей критично рисунок 6.107, 6.108.

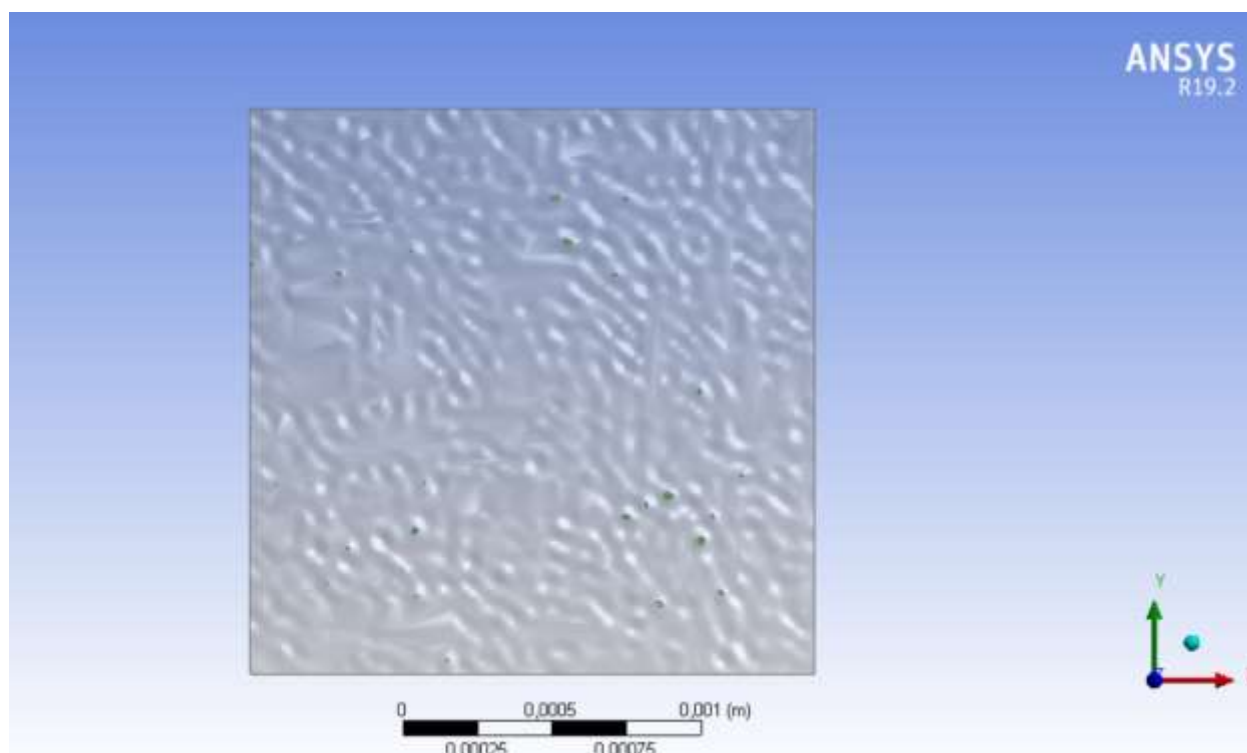


Рис. 6.107. Геометрия поверхности для теплового расчета

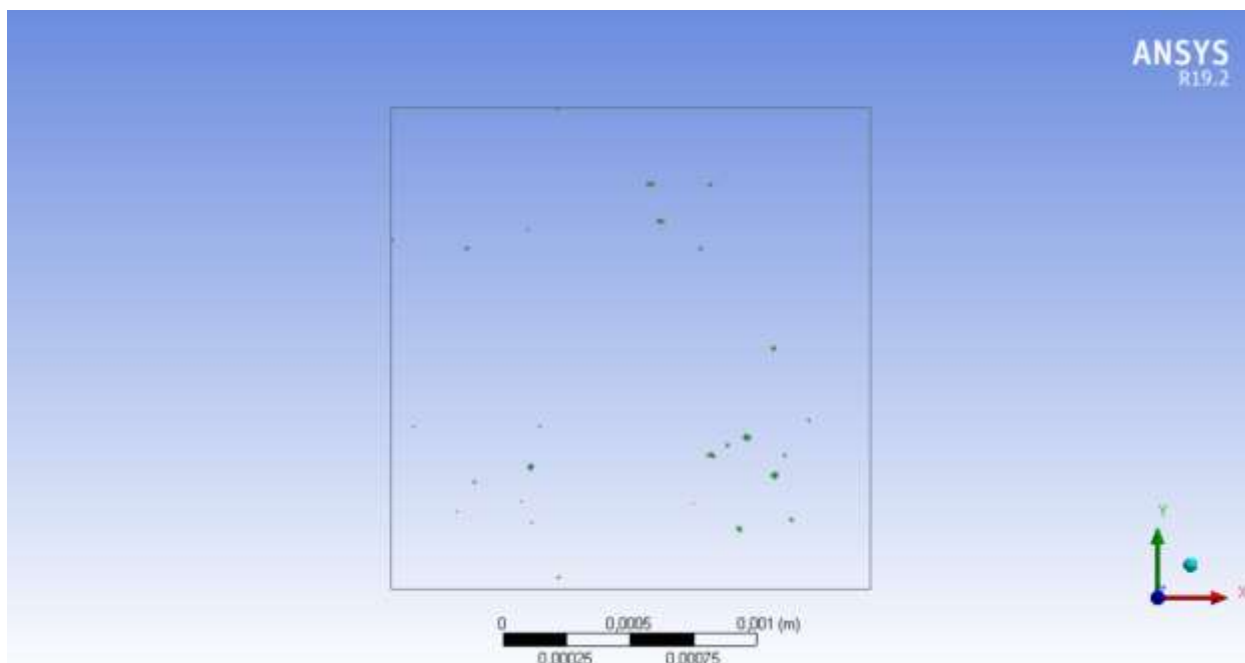


Рис. 6.108. Фактическая площадь контакта

Для качественного представления результатов теплового расчета необходимо качественно реализовать расчетную сетку. Использована функция ограничения максимального размера ячейки контакта, что важно для распространения теплоты.

Сетка построена с помощью функции Body Sizing с треугольными элементами и максимальным размером ячейки  $2,3 \cdot 10^{-5}$  (см. рисунок 6.109). С помощью настроек сетки удалось получить ее оптимальные размеры, благодаря которым можно легко увидеть микронеровности. Такие настройки позволяют более детально увидеть поле температур в зоне контакта. Количество элементов сетки - 514971, количество узлов – 750228.

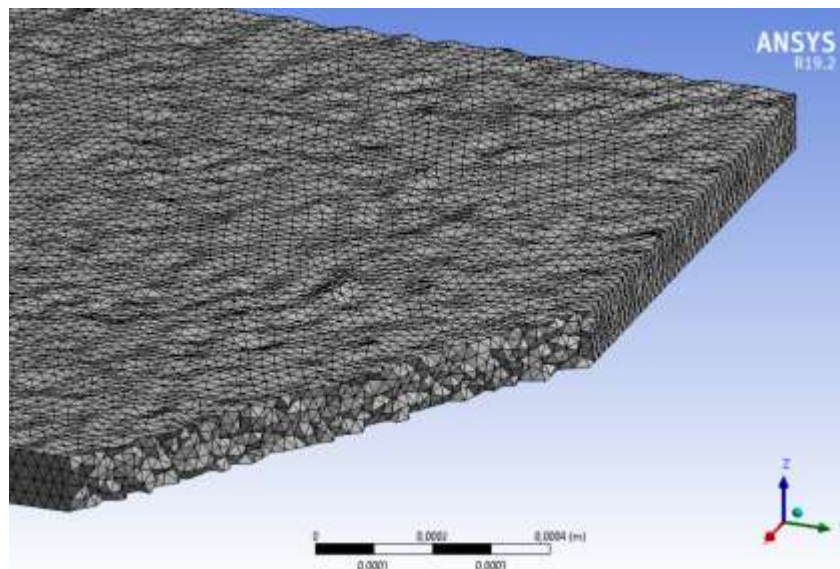


Рис. 6.109. Сеточная модель для теплового анализа

После передачи сеточной модели в модуль расчета для нее были заданы граничные условия (см. рис. 6.110) следующего типа:

- Нагрузка А: к верхней границе приложена температура  $T$ , которое изменяется в диапазоне 200 до 800 С
- Нагрузка В: к нижней поверхности приложен тепловой поток равный  $10000 \text{ В/м}^2$
- Нагрузка С: перенос тепла излучением для двух противоположных поверхностей, степень черноты 0,7

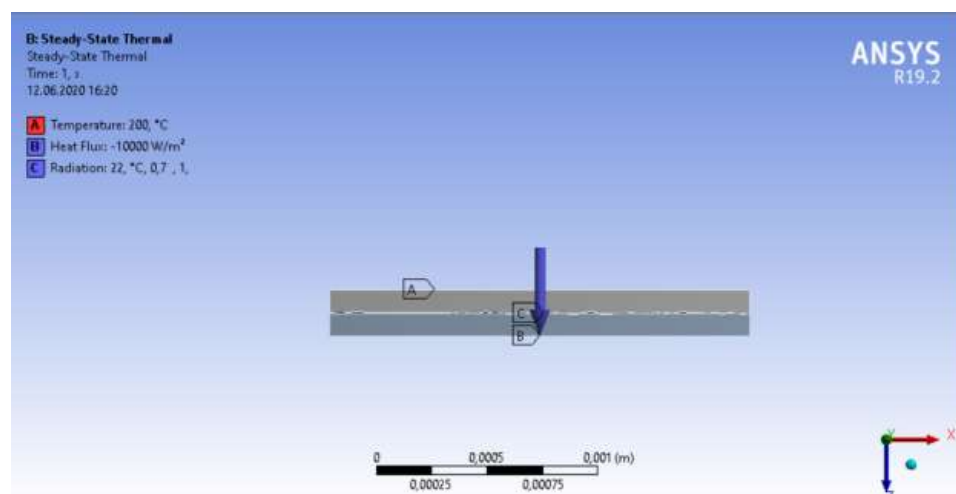


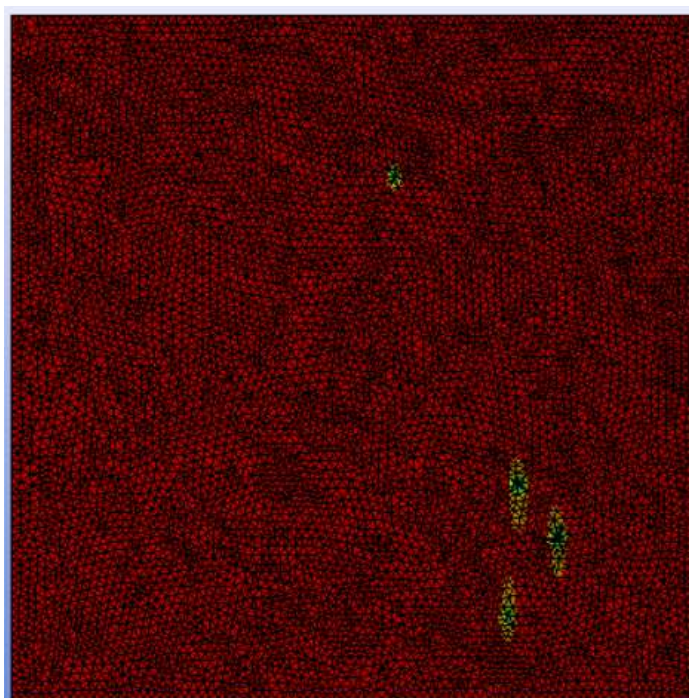
Рис. 6.110. Схема граничных условий.



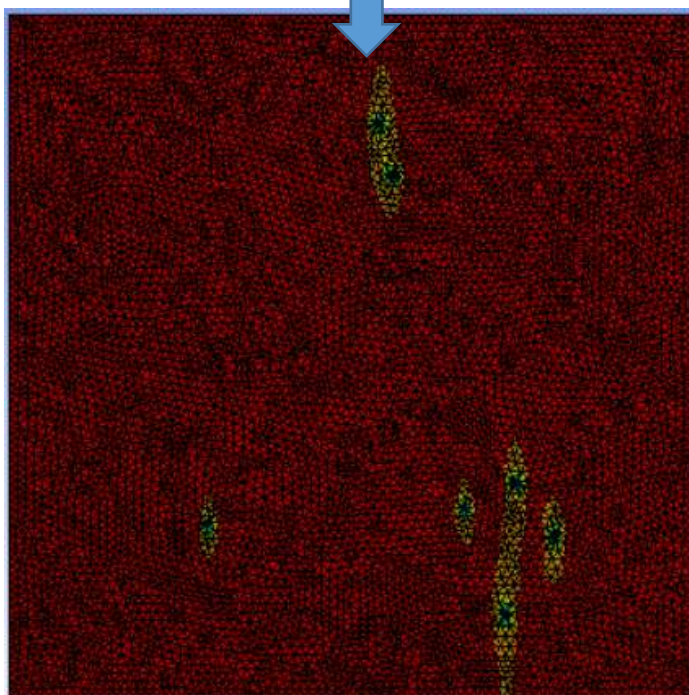
Тепловой расчет проводился для 231 различных моделей при разных значениях межконтактного давления, температурах и углах армирования.

На рисунке 6.111 демонстрируется изменение поля температур в зависимости от давления на примере угла армирования  $[0]$  и при температуре  $600^\circ\text{C}$ .

0,19871 МПа

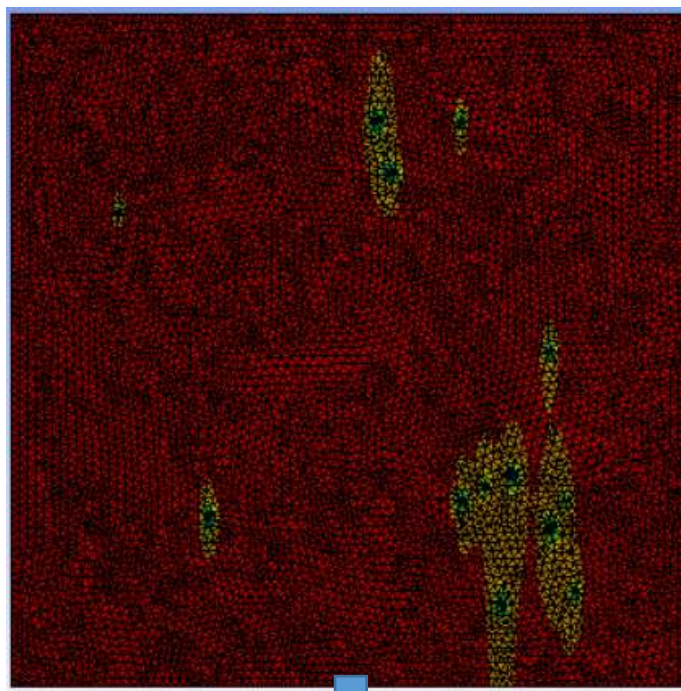


0,55585 МПа





1 МПа



3 МПа

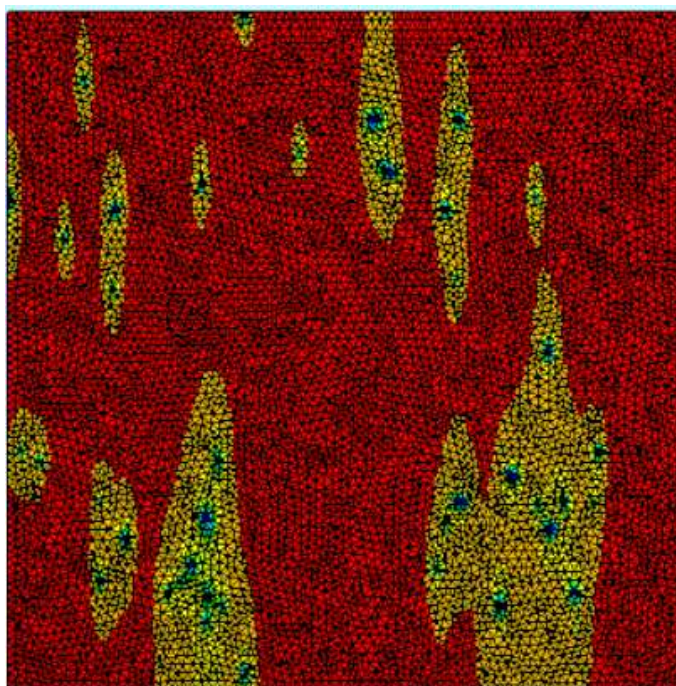
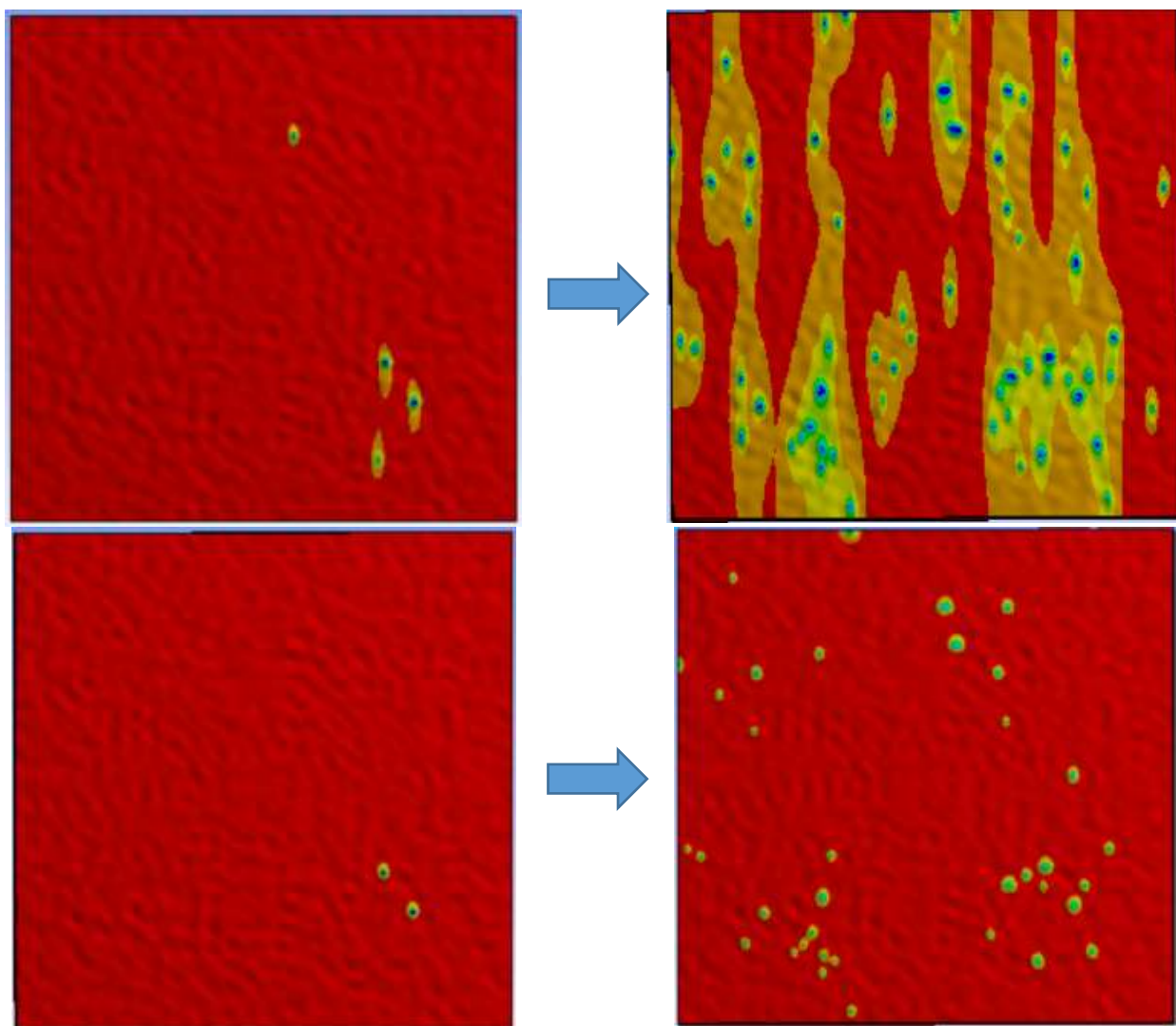


Рис. 6.111. Изменения поля температур в зависимости от давления, угол армирования [0]

Так же следует представить, то, как изменилось поле температур в зависимости от угла армирования при минимальном и максимальном рассмотренном давлении, на рисунке 6.112 представлено поле температур для верхней пластины, на рисунке 6.113 поле температур для нижней пластины. Результат представлен при 600 °С и давлениях 0,19871 МПа и 6 МПа, то есть при минимальном и максимальном смещении поверхностей относительно друг друга.



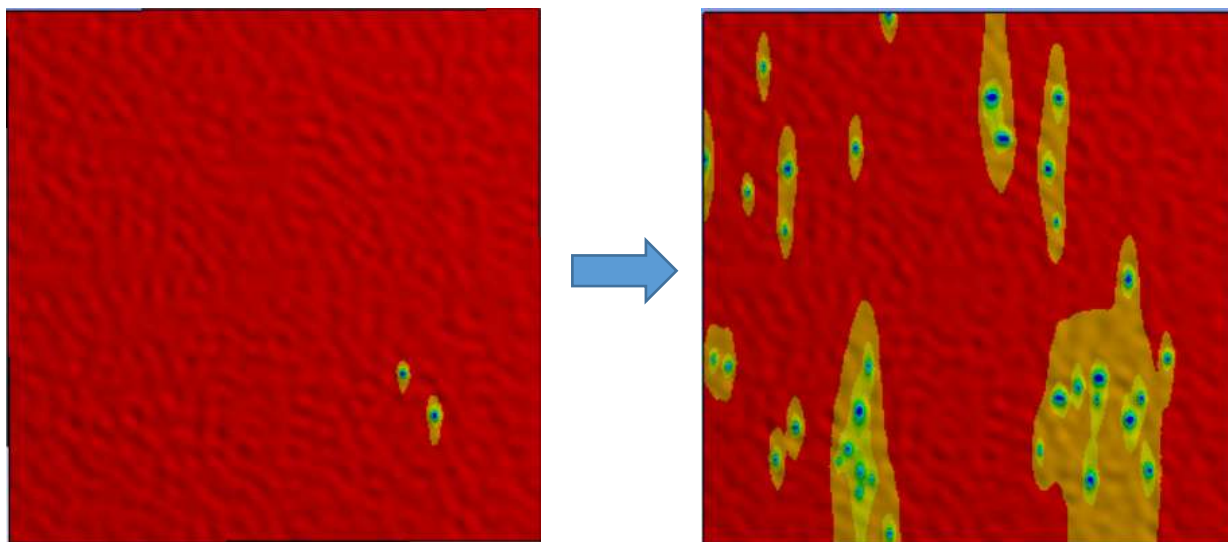
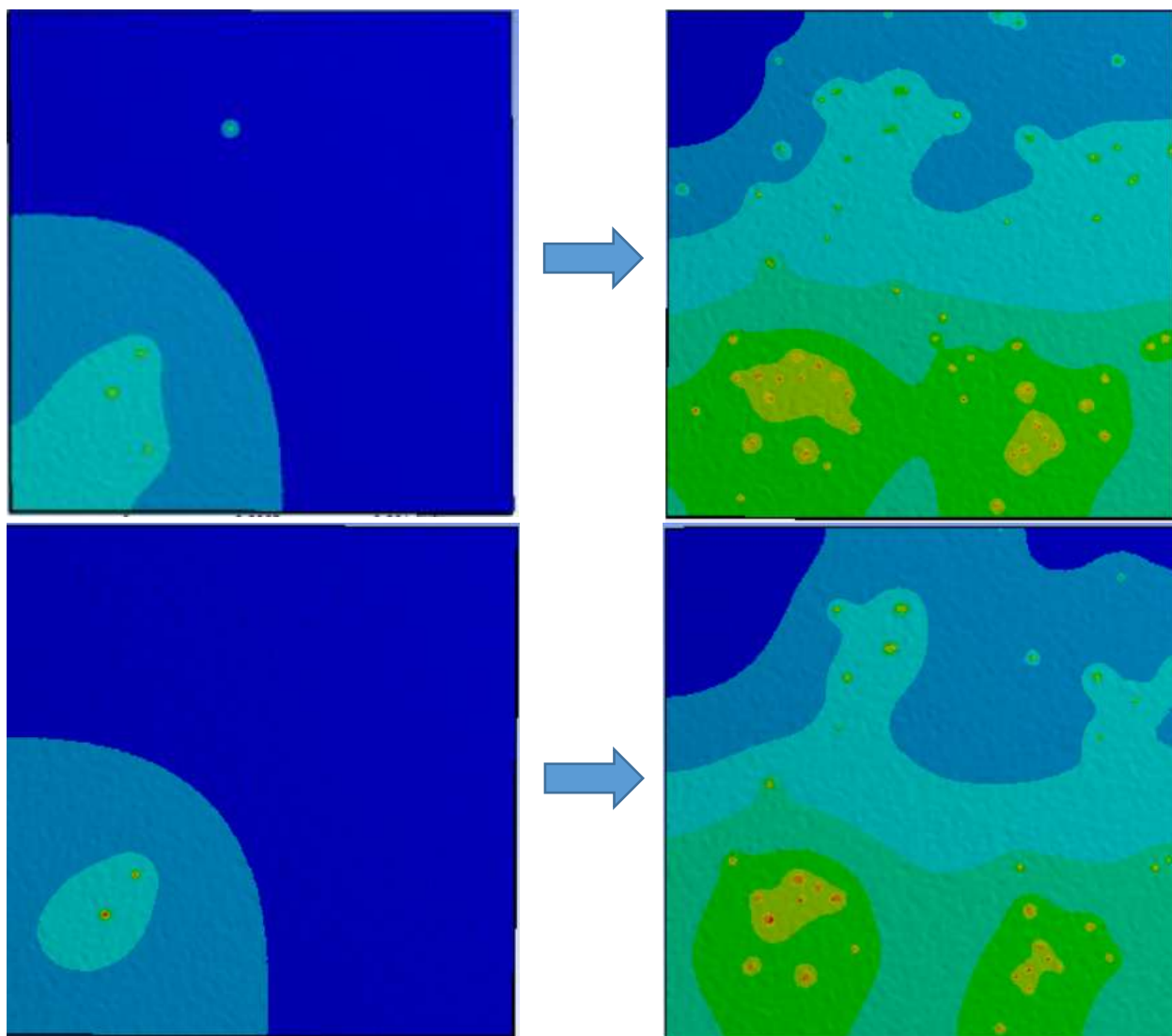


Рис. 6.112. Изменение поля температур верхней пластины в зависимости от угла армирования и давления. Соответственно угол армирования  $[0]$ ,  $[45]$  и  $[90]$





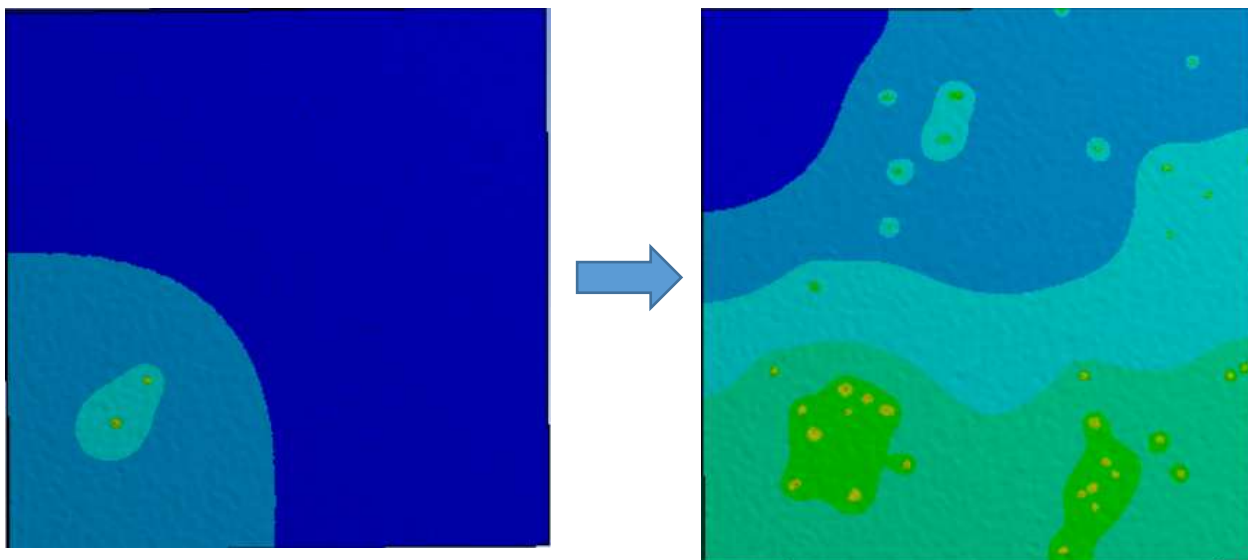


Рис. 6.113. Изменение поля температур нижней пластины в зависимости от угла армирования и давления. Соответственно угол армирования [0], [45] и [90]

Можно увидеть, что максимальные значения температур находятся в зонах непосредственного контакта, что соответствует реальности. Полученные значения температур в контактирующих поверхностях использовались для расчета КТС между соответствующими парами материалов.

Располагая картиной формирования площади контакта, была задана температура верхнего образца, а также тепловой поток, отводимый с другого конца. При этом величина контактного термического сопротивления определяется по формуле:

$$R_k = \frac{T_{\text{верх}} - T_{\text{нижн}}}{q}, \text{ где}$$

$T_{\text{верх}}$ ,  $T_{\text{нижн}}$  – средние температуры на поверхности горячей и холодной стороны.

Некоторые результаты расчетов представлены ниже в виде графиков и таблиц. Зависимости контактного термического сопротивления от давления, температуры и угла армирования представлены в таблицах 6.24, 6.25, 6.26, а также проиллюстрированы на рисунках 6.114, 6.115, 6.116.

Таблица 6.24. КТС при давлении 0,19871 МПа.

| Угол     | Смещение | $q$                | $T_{\text{ср}}^{\text{гор}}$ | $T_{\text{ср}}^{\text{гор}}$ | $R_k \cdot 10^4$     |
|----------|----------|--------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| угл. гр. | мкм      | кВт/м <sup>2</sup> | °С                           | °С                           | м <sup>2</sup> *К/Вт |
| 0        | 1,4174   | 10                 | 199,41                       | 17,817                       | 181,593              |
|          | 1,4174   |                    | 299,5                        | 168,86                       | 130,64               |
|          | 1,4174   |                    | 399,52                       | 289,88                       | 109,64               |
|          | 1,4174   |                    | 499,51                       | 409,51                       | 90                   |
|          | 1,4174   |                    | 599,5                        | 525,22                       | 74,28                |
|          | 1,4174   |                    | 699,5                        | 638,29                       | 61,21                |
| 45       | 1,033    | 10                 | 799,48                       | 748,33                       | 51,15                |
|          | 1,033    |                    | 199,96                       | 67,539                       | 132,421              |
|          | 1,033    |                    | 299,96                       | 186,79                       | 113,17               |
|          | 1,033    |                    | 399,96                       | 303,24                       | 96,72                |
|          | 1,033    |                    | 499,96                       | 418,15                       | 81,81                |
|          | 1,033    |                    | 599,96                       | 531,91                       | 68,05                |
|          | 1,033    |                    | 699,96                       | 643,31                       | 56,65                |
| 90       | 1,0721   | 10                 | 799,96                       | 752,64                       | 47,32                |
|          | 1,0721   |                    | 199,49                       | -79,376                      | 278,866              |
|          | 1,0721   |                    | 299,48                       | 73,849                       | 225,631              |
|          | 1,0721   |                    | 399,49                       | 225,16                       | 174,33               |
|          | 1,0721   |                    | 499,49                       | 367,35                       | 132,14               |
|          | 1,0721   |                    | 599,49                       | 499,16                       | 100,33               |
|          | 1,0721   |                    | 699,48                       | 622,08                       | 77,4                 |

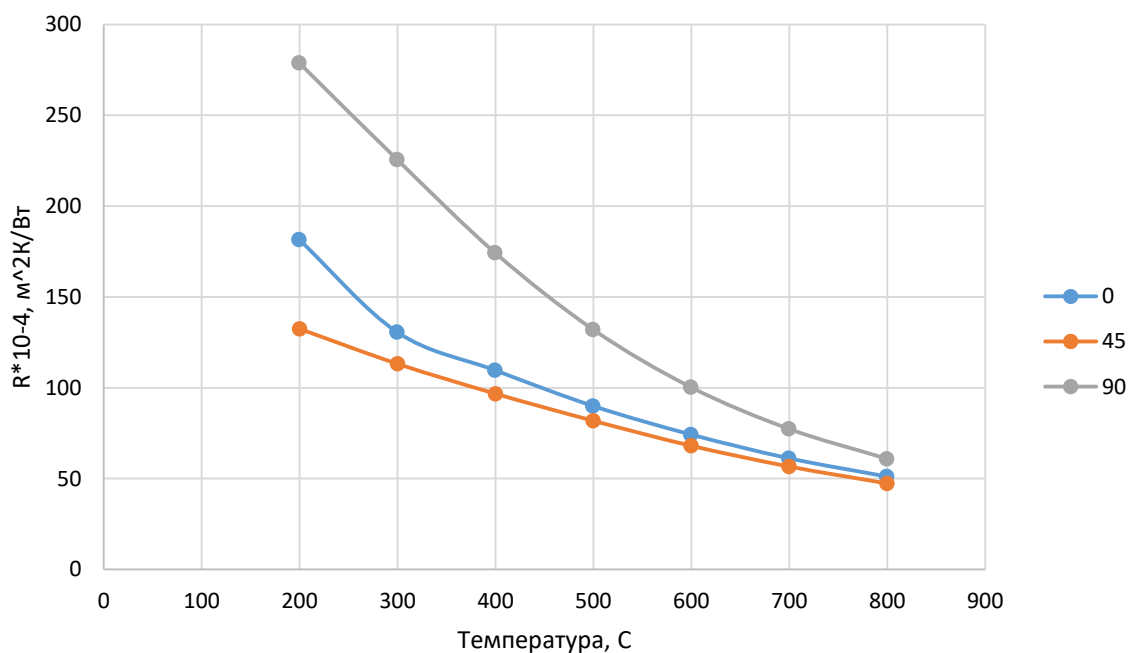


Рисунок 6.114 График зависимости КТС от температуры при разных углах армирования и давлении  $P = 0,19871$  МПа

Таблица 6.25. КТС при давлении 1 МПа.

| Угол     | Смещение | $q$                | $T_{\text{ср}}^{\text{гор}}$ | $T_{\text{ср}}^{\text{гор}}$ | $R_k \cdot 10^4$     |
|----------|----------|--------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| угл. гр. | мкм      | кВт/м <sup>2</sup> | °C                           | °C                           | м <sup>2</sup> *К/Вт |
| 0        | 2,41992  | 10                 | 199,48                       | 162,95                       | 36,53                |
|          | 2,41992  |                    | 299,49                       | 265,3                        | 34,19                |
|          | 2,41992  |                    | 399,5                        | 367,22                       | 32,28                |
|          | 2,41992  |                    | 499,5                        | 469,23                       | 30,27                |
|          | 2,41992  |                    | 599,49                       | 571,3                        | 28,19                |
|          | 2,41992  |                    | 699,49                       | 673,32                       | 26,17                |
|          | 2,41992  |                    | 799,48                       | 775,37                       | 24,11                |
| 45       | 1,69856  | 10                 | 199,96                       | 158,05                       | 41,91                |
|          | 1,69856  |                    | 299,96                       | 261,11                       | 38,85                |
|          | 1,69856  |                    | 399,96                       | 363,68                       | 36,28                |
|          | 1,69856  |                    | 499,96                       | 466,43                       | 33,53                |
|          | 1,69856  |                    | 599,96                       | 569,26                       | 30,7                 |

|    |         |    |        |        |       |
|----|---------|----|--------|--------|-------|
|    | 1,69856 |    | 699,96 | 671,84 | 28,12 |
|    | 1,69856 |    | 799,96 | 774,4  | 25,56 |
| 90 | 1,8935  | 10 | 199,46 | 127,13 | 72,33 |
|    | 1,8935  |    | 299,47 | 233,73 | 65,74 |
|    | 1,8935  |    | 399,47 | 339,32 | 60,15 |
|    | 1,8935  |    | 499,47 | 445,29 | 54,18 |
|    | 1,8935  |    | 599,47 | 551,51 | 47,96 |
|    | 1,8935  |    | 699,47 | 657,41 | 42,06 |
|    | 1,8935  |    | 799,47 | 762,38 | 37,09 |

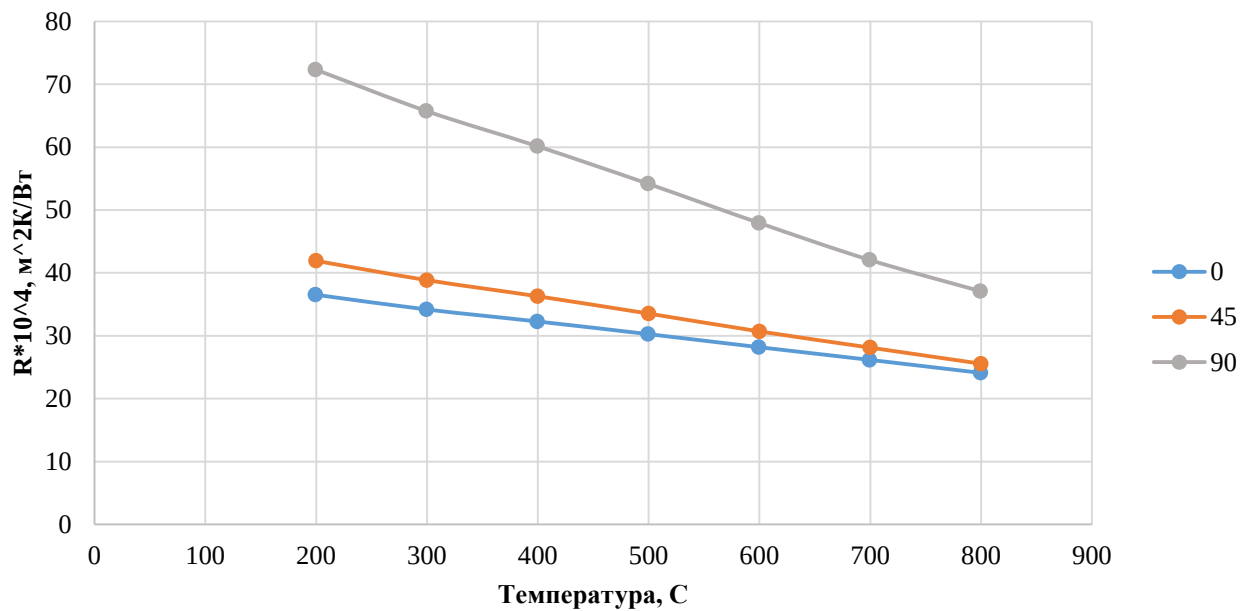


Рис. 6.115. График зависимости КТС от температуры при разных углах армирования и давлении  
 $P = 1 \text{ МПа}$ .

Таблица 6.26. КТС при давлении 3 МПа.

| Угол     | Смещение | $q$                | $T_{\text{ср}}^{\text{гор}}$ | $T_{\text{ср}}^{\text{гор}}$ | $R_k \cdot 10^4$     |
|----------|----------|--------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| угл. гр. | мкм      | кВт/м <sup>2</sup> | °С                           | °С                           | м <sup>2</sup> *К/Вт |
| 0        | 3,14518  | 10                 | 199,48                       | 187,25                       | 12,23                |
|          | 3,14518  |                    | 299,49                       | 287,75                       | 11,74                |
|          | 3,14518  |                    | 399,5                        | 388,11                       | 11,39                |
|          | 3,14518  |                    | 499,5                        | 488,41                       | 11,09                |
|          | 3,14518  |                    | 599,41                       | 588,72                       | 10,69                |
|          | 3,14518  |                    | 699,48                       | 689                          | 10,48                |
|          | 3,14518  |                    | 799,47                       | 789,31                       | 10,16                |
| 45       | 2,1532   | 10                 | 199,96                       | 184,68                       | 15,28                |
|          | 2,1532   |                    | 299,96                       | 285,42                       | 14,54                |
|          | 2,1532   |                    | 399,96                       | 385,95                       | 14,01                |
|          | 2,1532   |                    | 499,96                       | 486,58                       | 13,38                |
|          | 2,1532   |                    | 599,96                       | 587,19                       | 12,77                |
|          | 2,1532   |                    | 699,96                       | 687,68                       | 12,28                |
|          | 2,1532   |                    | 799,96                       | 788,25                       | 11,71                |
| 90       | 2,531    | 10                 | 199,47                       | 168,2                        | 31,27                |
|          | 2,531    |                    | 299,48                       | 269,87                       | 29,61                |
|          | 2,531    |                    | 399,48                       | 371,2                        | 28,28                |
|          | 2,531    |                    | 499,47                       | 472,72                       | 26,75                |
|          | 2,531    |                    | 599,47                       | 574,36                       | 25,11                |
|          | 2,531    |                    | 699,46                       | 675,99                       | 23,47                |
|          | 2,531    |                    | 799,45                       | 777,63                       | 21,82                |



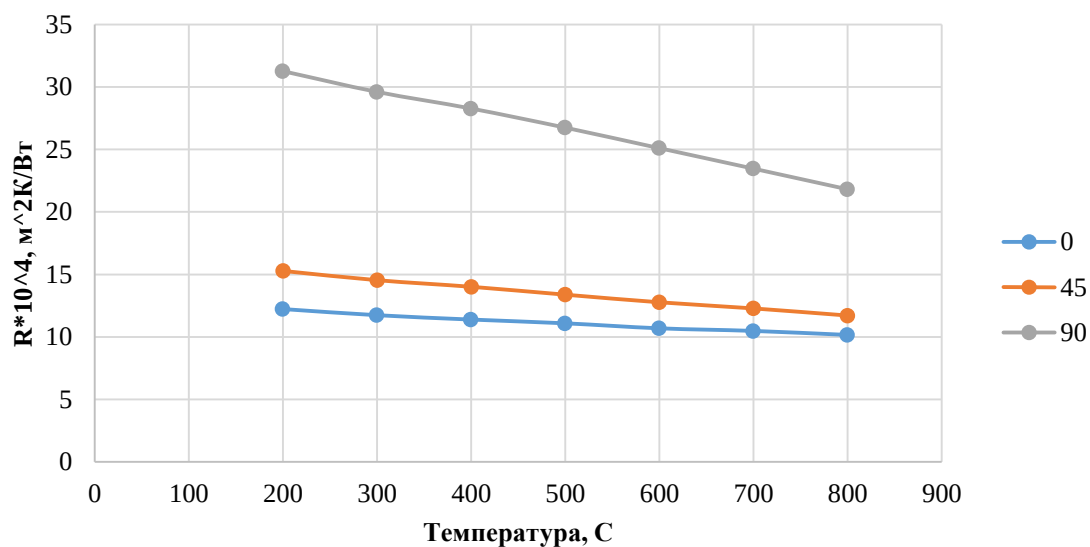


Рис. 6.116. График зависимости КТС от температуры при разных углах армирования и давлении  $P = 3 \text{ МПа}$

Таким образом, при повышении давления контактное термическое сопротивление уменьшается. При увеличении давления и росте температуры разница между предыдущим и последующим значением также уменьшается.

Зависимости контактного термического сопротивления от давления и угла армирования представлены в таблицах 6.27, 6.28, 6.29, а также проиллюстрированы на рисунках 6.117, 6.118, 6.119.

Таблица 6.27. КТС в  $10^{-4} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  при температуре  $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

| Р, МПа  | Угол 0  | Угол 45 | Угол 90 |
|---------|---------|---------|---------|
| 0,19871 | 181,593 | 132,421 | 278,866 |
| 0,2793  | 101,221 | 110,516 | 265,941 |
| 0,4189  | 70,92   | 100,974 | 134,439 |
| 0,55585 | 62,02   | 64,06   | 128,76  |
| 0,6981  | 58,36   | 57,76   | 102,788 |
| 1       | 36,53   | 41,91   | 72,33   |
| 2       | 18,01   | 20,93   | 40,39   |
| 3       | 12,23   | 15,28   | 31,27   |
| 4       | 10,31   | 10,84   | 22,43   |
| 5       | 8,27    | 8,41    | 18,26   |
| 6       | 6,45    | 6,59    | 13,98   |

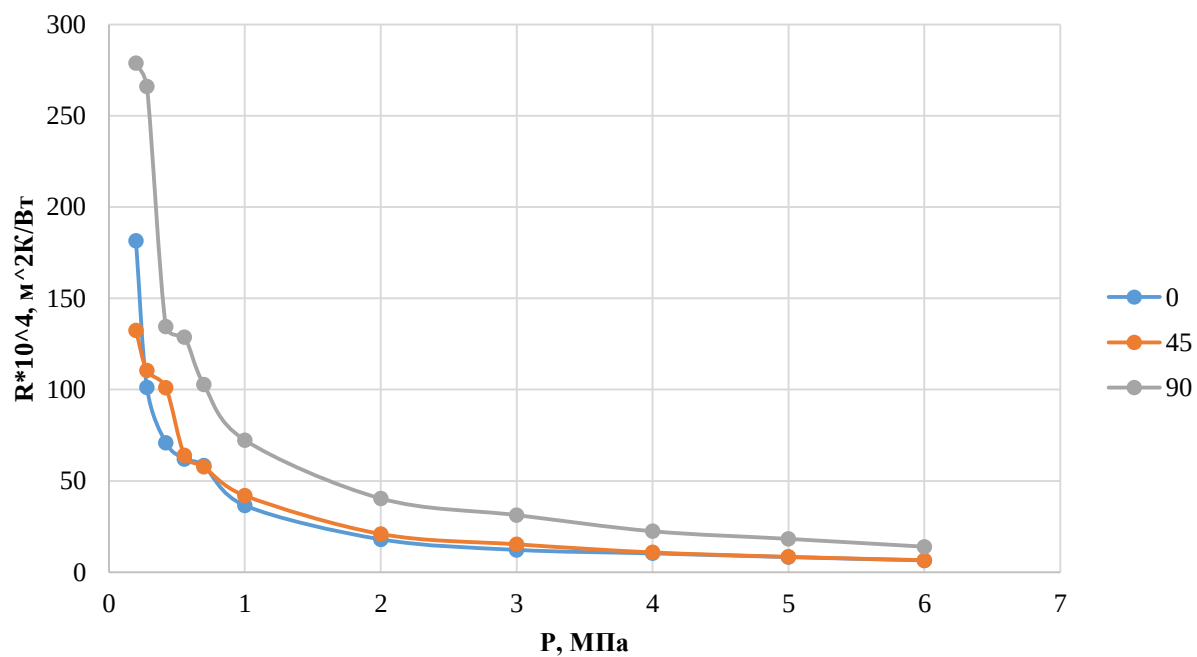


Рис. 6.117. График зависимости КТС от давления по данным таблицы 6.27.

Таблица 6.28. КТС в  $10^{-4} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  при температуре  $T = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$

| Р, МПа  | Угол 0 | Угол 45 | Угол 90 |
|---------|--------|---------|---------|
| 0,19871 | 109,64 | 96,72   | 174,33  |
| 0,2793  | 78,72  | 83,66   | 164,43  |
| 0,4189  | 58,37  | 77,81   | 100,2   |
| 0,55585 | 51,91  | 53      | 96,77   |
| 0,6981  | 49,2   | 48,4    | 79,15   |
| 1       | 32,28  | 36,28   | 60,15   |
| 2       | 16,56  | 18,94   | 35,74   |
| 3       | 11,39  | 14,01   | 28,28   |
| 4       | 9,53   | 10,06   | 20,69   |
| 5       | 7,13   | 7,85    | 17,02   |
| 6       | 5,66   | 6,17    | 13,17   |

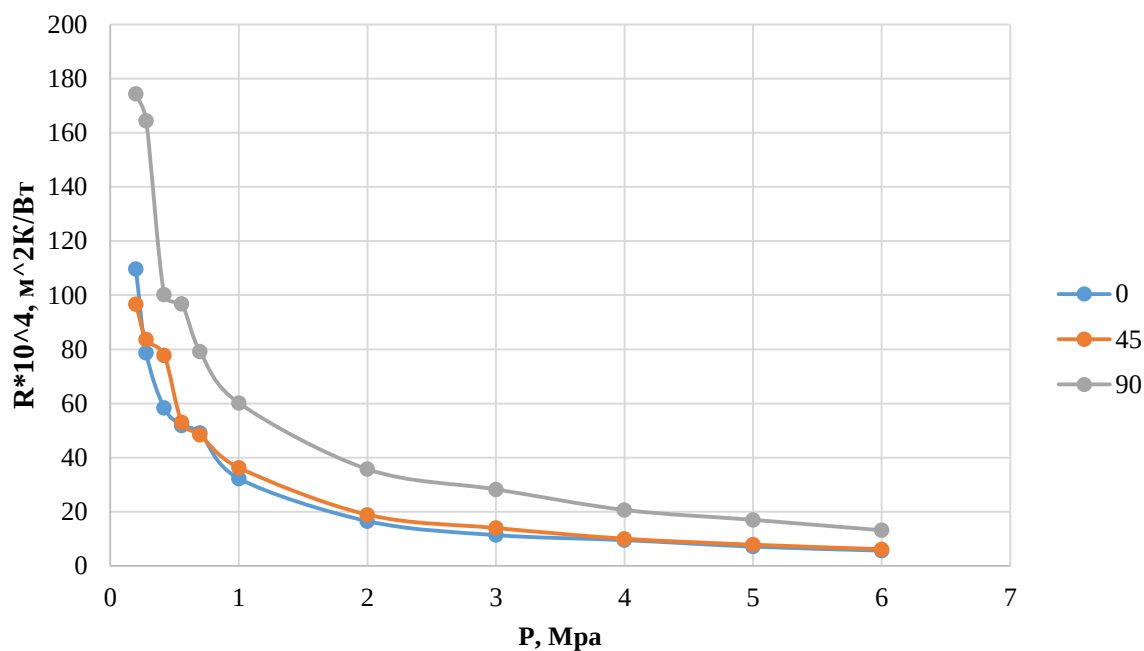


Рис. 6.118. График зависимости КТС от давления по данным таблицы 6.28.

Таблица 6.29. КТС в  $10^{-4} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  при температуре  $T = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$

| Р, МПа  | Угол 0 | Угол 45 | Угол 90 |
|---------|--------|---------|---------|
| 0,19871 | 74,28  | 68,05   | 100,33  |
| 0,2793  | 59,36  | 61,07   | 97,13   |
| 0,4189  | 46,9   | 57,81   | 70,83   |
| 0,55585 | 42,59  | 42,51   | 69,08   |
| 0,6981  | 40,72  | 39,41   | 59,58   |
| 1       | 28,19  | 30,7    | 47,96   |
| 2       | 15,36  | 16,97   | 30,87   |
| 3       | 10,69  | 12,77   | 25,11   |
| 4       | 9,27   | 9,32    | 18,9    |
| 5       | 6,85   | 7,34    | 15,76   |
| 6       | 4,81   | 5,8     | 12,36   |

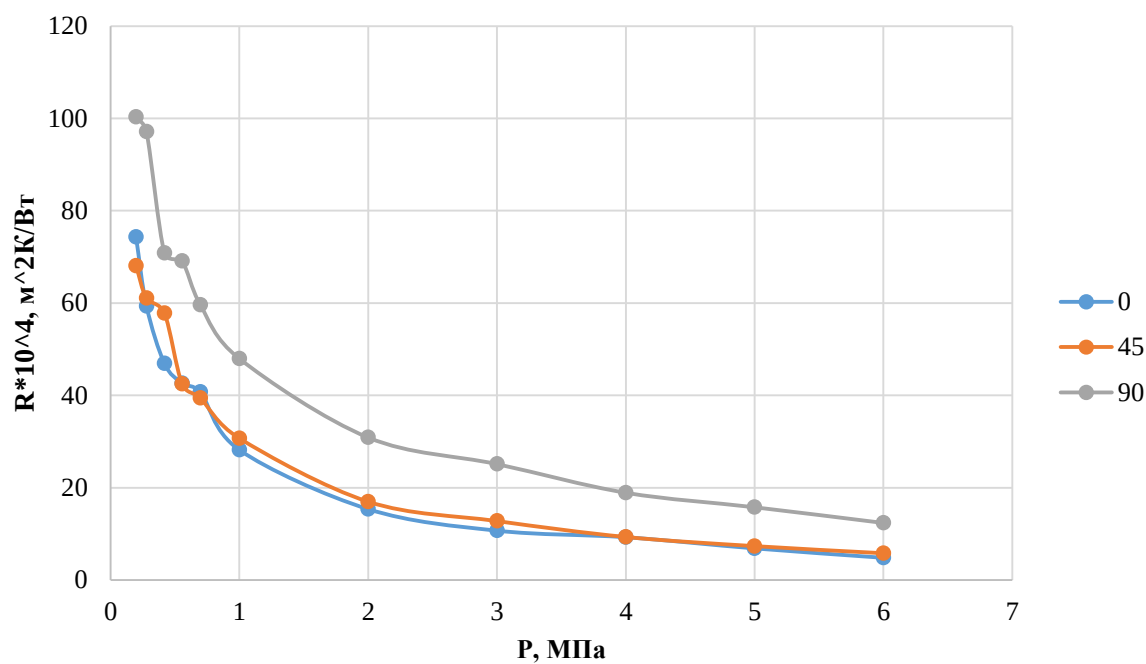


Рис. 6.119. График зависимости КТС от давления по данным таблицы 6.29.

График зависимости КТС от при разных температурах представлен на рисунке 6.120.

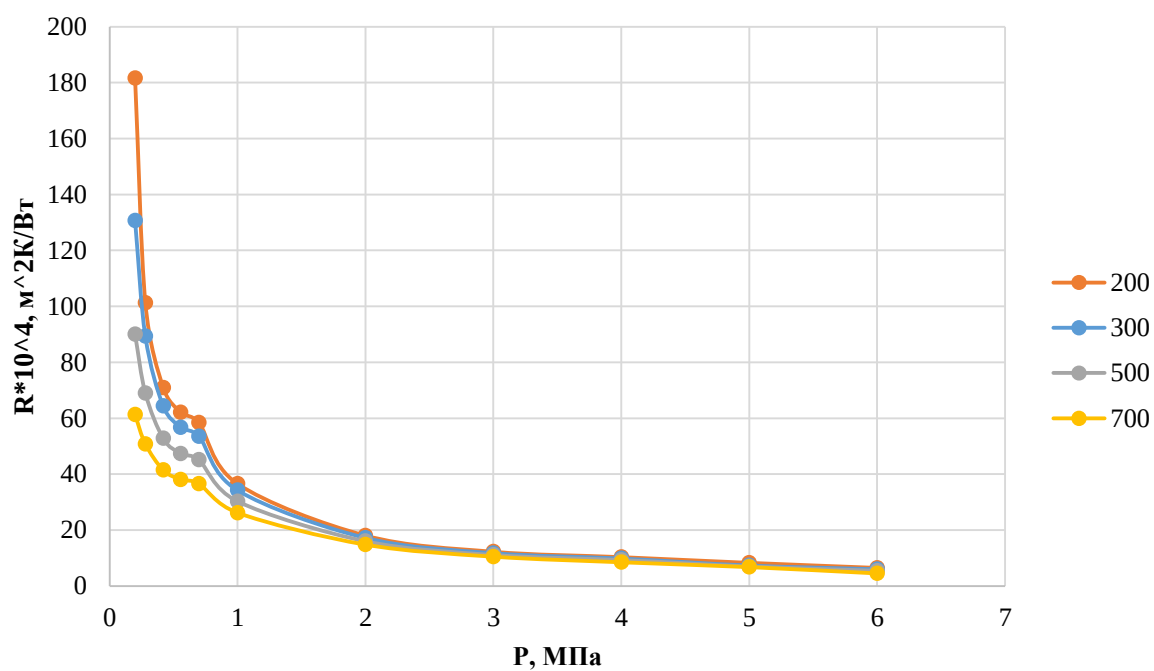


Рис. 6.120. Зависимость КТС от давления при разных температурах и угле армирования [0]

В настоящее время из всех имеющихся аналитических формул по расчёту  $R_K$  в безвоздушной среде, ввиду отсутствия в них эмпирических коэффициентов, требующих специальной методики определения, для широкого применения существует ряд формул, сравнение с результатами которых проводилась верификация метода расчета КТС:

Рассмотрим зависимости каждого автора и сравним их с полученной моделью (см. таблицу 6.30). Все теплофизические свойства берутся из известных источников. Поскольку значения КТС, вычисленные по методике Попова В.М. значительно превышают значения всех других авторов, то эти данные не были отражены на графиках.

Таблица 6.30. Зависимости КТС в  $10^{-4} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  от давления при  $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Угол армирования [0]

| Р, МПа  | Модель | [116]  | [324] | [88]  |
|---------|--------|--------|-------|-------|
| 0,19871 | 90     | 103,00 | 31,34 | 34,09 |
| 0,2793  | 68,94  | 83,86  | 23,39 | 27,23 |
| 0,4189  | 52,74  | 65,65  | 16,50 | 20,84 |
| 0,55585 | 47,35  | 55,34  | 12,94 | 17,29 |
| 0,6981  | 45,07  | 48,22  | 10,64 | 14,88 |
| 1       | 30,27  | 38,81  | 7,81  | 11,73 |
| 2       | 15,99  | 25,54  | 4,30  | 7,43  |
| 3       | 11,09  | 19,99  | 3,04  | 5,68  |
| 4       | 9,27   | 16,80  | 2,37  | 4,70  |
| 5       | 6,99   | 14,68  | 1,96  | 4,06  |
| 6       | 5,44   | 13,15  | 1,67  | 3,60  |

На рисунке 6.121 представлен график, на котором наглядно можно увидеть полученные зависимости и сравнить их.

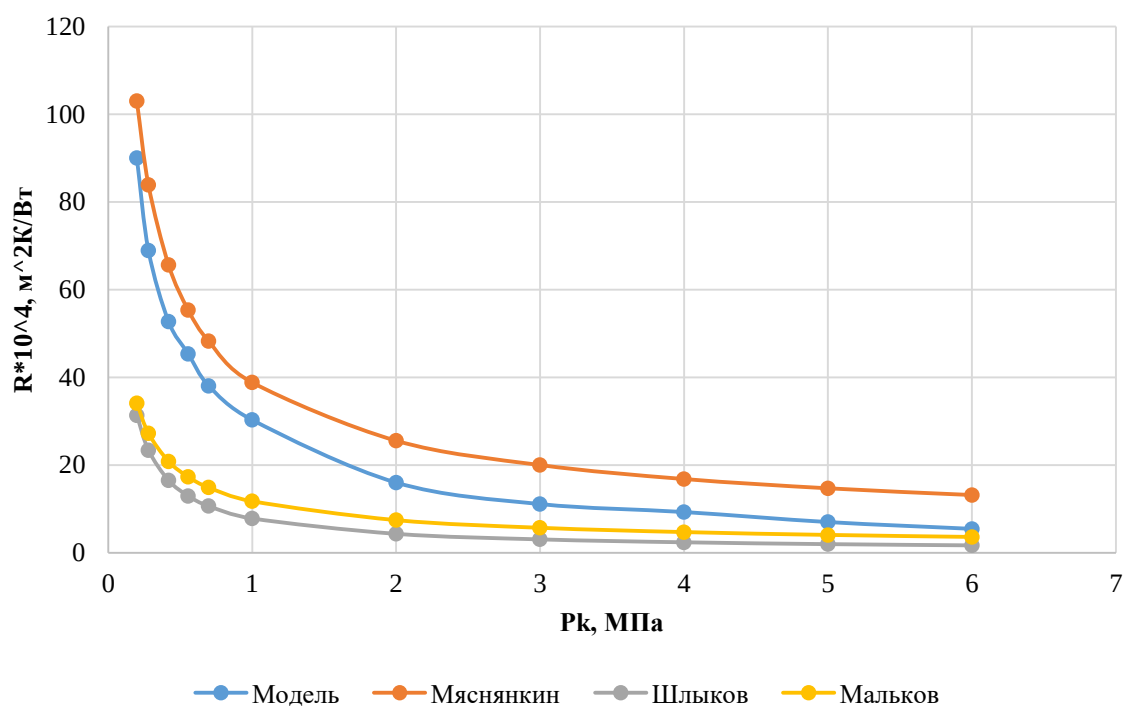


Рис. 6.121. Совместный график зависимости  $R_k$  от  $P_k$  по таблице 6.30.

Из графика можно увидеть, что значения модели в целом не сильно отличаются от значений, которые получены по теоретическим зависимостям авторов. Для подтверждения данного утверждения представим еще несколько расчетных моделей.

Таблица 6.31. Зависимости КТС в  $10^{-4} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  от давления при  $T = 700^\circ \text{C}$ . Угол армирования  $[0]$

| Р, МПа  | Модель | [116]  | [324] | [88]  |
|---------|--------|--------|-------|-------|
| 0,19871 | 61,21  | 55,334 | 18,39 | 20,00 |
| 0,2793  | 50,77  | 45,05  | 13,72 | 15,98 |
| 0,4189  | 41,45  | 35,267 | 9,68  | 12,23 |
| 0,55585 | 38,06  | 29,728 | 7,59  | 10,14 |
| 0,6981  | 36,57  | 25,906 | 6,24  | 8,73  |
| 1       | 26,17  | 20,851 | 4,58  | 6,88  |
| 2       | 14,78  | 13,718 | 2,52  | 4,36  |
| 3       | 10,48  | 10,738 | 1,78  | 3,33  |
| 4       | 8,48   | 9,026  | 1,39  | 2,76  |
| 5       | 6,75   | 7,888  | 1,15  | 2,38  |
| 6       | 4,49   | 7,065  | 0,98  | 2,11  |

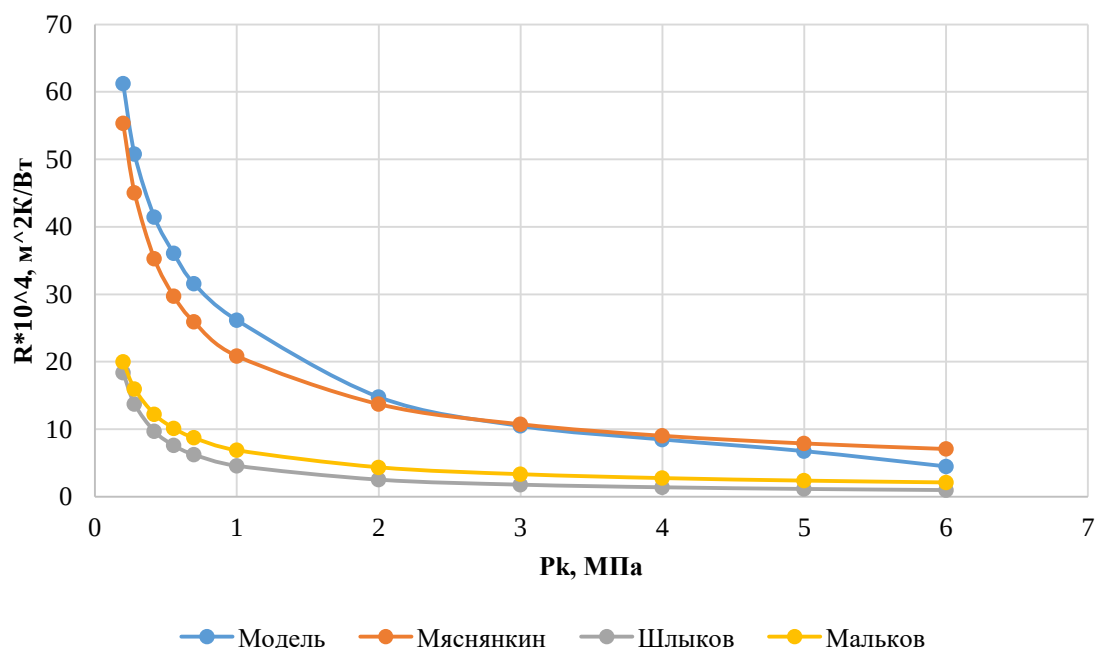


Рис. 1.122. Совместный график зависимости  $R_k$  от  $P_k$  по таблице 6.31

Ниже приведены результаты расчёта КТС по зависимостям авторов для других углов армирования.

Таблица 6.32. Зависимости КТС в  $10^{-4} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  от давления при  $T = 500^\circ \text{C}$ . Угол армирования  $[90]$

| Р, МПа  | Модель | [116] | [324] | [88]  |
|---------|--------|-------|-------|-------|
| 0,19871 | 132,14 | 82,41 | 30,41 | 33,07 |
| 0,2793  | 123,32 | 66,99 | 22,69 | 26,42 |
| 0,4189  | 85     | 52,45 | 16,01 | 20,22 |
| 0,55585 | 73,49  | 44,21 | 12,55 | 16,77 |
| 0,6981  | 65,26  | 38,52 | 10,32 | 14,43 |
| 1       | 54,18  | 31,01 | 7,58  | 11,38 |
| 2       | 33,39  | 20,40 | 4,17  | 7,21  |
| 3       | 23,75  | 15,97 | 2,95  | 5,51  |
| 4       | 19,83  | 13,42 | 2,30  | 4,56  |
| 5       | 16,41  | 11,73 | 1,90  | 3,94  |
| 6       | 12,77  | 10,51 | 1,62  | 3,49  |

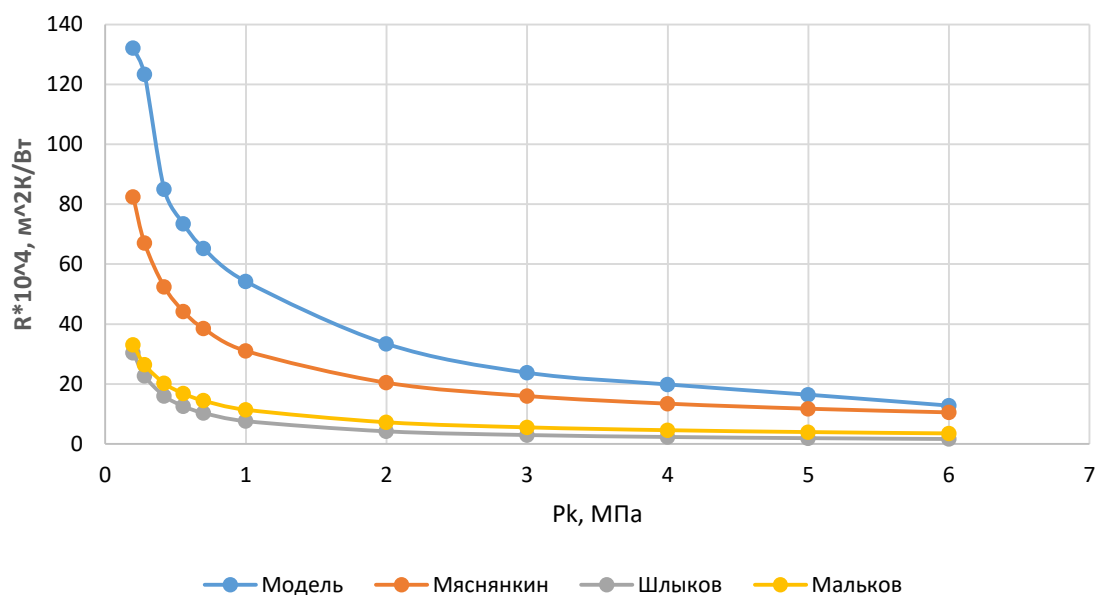


Рис. 6.123. Совместный график зависимости  $R_k$  от  $P_k$  по таблице 6.32.

Таблица 6.33. Зависимости КТС в  $10^{-4} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  от давления при  $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Угол армирования  $[90]$

| $P$ , МПа | Модель | [116] | [324] | [88]  |
|-----------|--------|-------|-------|-------|
| 0,19871   | 77,4   | 75,84 | 30,09 | 32,73 |
| 0,2793    | 75,98  | 61,74 | 22,45 | 26,15 |
| 0,4189    | 58,85  | 48,33 | 15,85 | 20,01 |
| 0,55585   | 57,66  | 40,74 | 12,42 | 16,60 |
| 0,6981    | 50,92  | 35,50 | 10,21 | 14,28 |
| 1         | 42,06  | 28,58 | 7,50  | 11,27 |
| 2         | 28,43  | 18,80 | 4,13  | 7,13  |
| 3         | 23,47  | 14,72 | 2,92  | 5,46  |
| 4         | 18     | 12,37 | 2,28  | 4,51  |
| 5         | 15,14  | 10,81 | 1,88  | 3,90  |
| 6         | 11,98  | 9,68  | 1,61  | 3,45  |



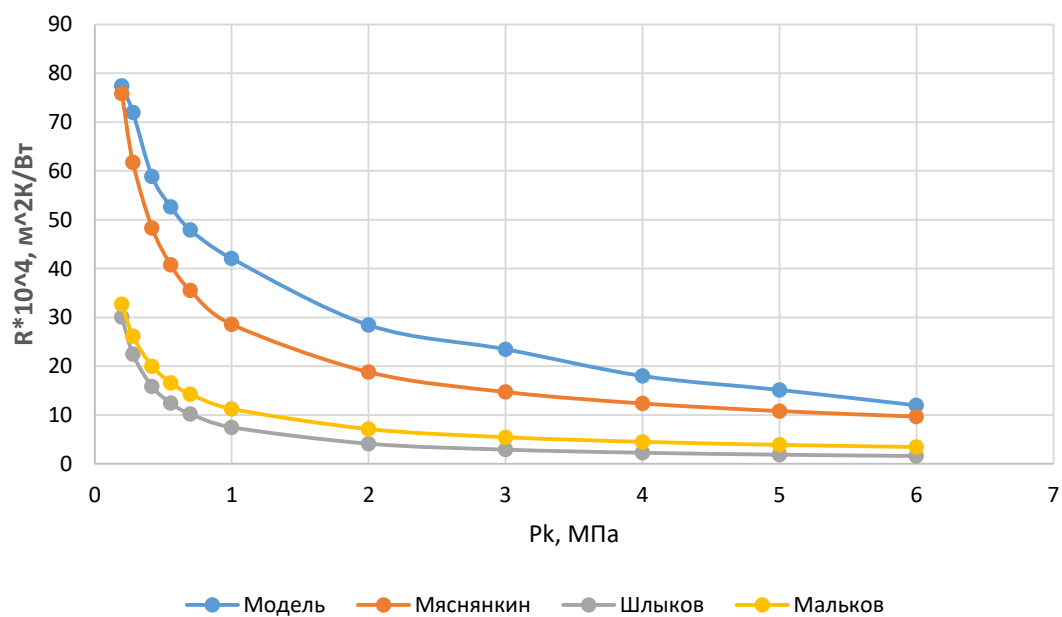


Рис. 6.124. Совместный график зависимости  $R_k$  от  $P_k$  по таблице 6.33.

Таблица 6.34. Зависимости КТС в  $10^{-4} \cdot \text{М}^2 \cdot \text{К/Вт}$  от давления при  $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Угол армирования [45]

| Р, МПа  | Модель | [116]  | [324] | [88]  |
|---------|--------|--------|-------|-------|
| 0,19871 | 81,81  | 130,76 | 43,36 | 47,17 |
| 0,2793  | 72,08  | 106,46 | 32,35 | 37,67 |
| 0,4189  | 67,63  | 83,34  | 22,83 | 28,83 |
| 0,55585 | 47,79  | 70,25  | 17,90 | 23,92 |
| 0,6981  | 43,95  | 61,22  | 14,72 | 20,58 |
| 1       | 33,53  | 49,27  | 10,80 | 16,24 |
| 2       | 17,96  | 32,42  | 5,95  | 10,28 |
| 3       | 13,38  | 25,38  | 4,20  | 7,86  |
| 4       | 9,68   | 21,33  | 3,28  | 6,50  |
| 5       | 7,58   | 18,64  | 2,71  | 5,61  |
| 6       | 5,98   | 16,70  | 2,31  | 4,98  |

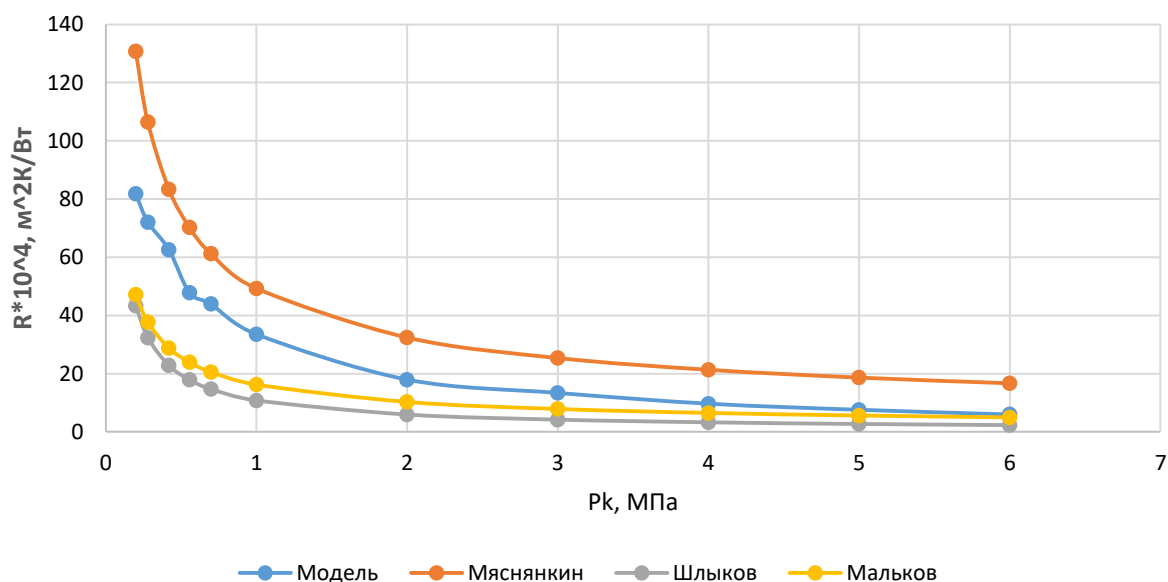


Рис. 6.125. Совместный график зависимости  $R_k$  от  $P_k$  по таблице 6.34.

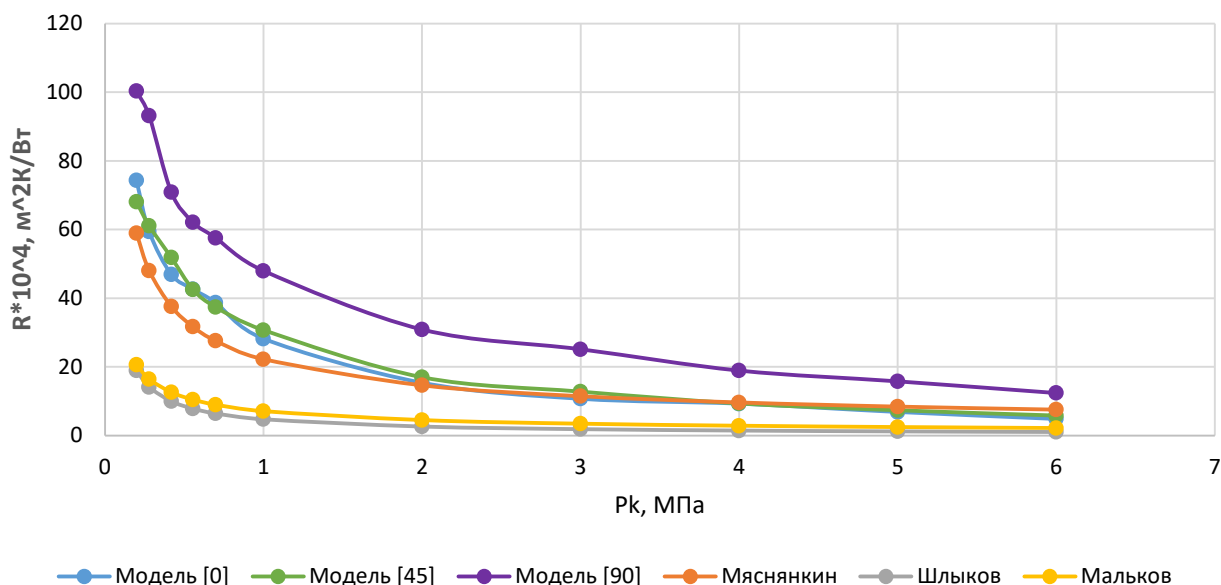


Рис. 6.126. График зависимости  $R_k$  от  $P_k$ , при разных углах армирования

Различие в значениях КТС между полученным по формулам и рассчитанным по реальной микрогеометрии прежде всего обусловлено тем, что указанные исследователи принимали пятна контакта для различных типов материалов постоянного размера, что не отражает физической сущности контактирования твердых тел. Неудобство проанализированных зависимостей заключается ещё и в том, что они предлагались авторами только для определенного круга материалов и в фиксированных диапазонах изменения безразмерной механической нагрузки.

## Выводы по Главе 6

Проведено комплексное исследование влияния ключевых факторов на контактное термическое сопротивление (КТС), охватывающее физико-механические свойства материалов, нормальное контактное давление, микрогеометрию поверхностей, температуру в зоне контакта, межфазную среду, наличие покрытий, циклическое нагружение, а также анизотропию свойств композитных материалов.

Установлено, что КТС представляет собой неотъемлемую функцию термомеханического состояния контактной пары, в которой доминирующее значение имеет реальная площадь контакта, формируемая под действием совокупности внешних и внутренних параметров. Особое внимание уделено влиянию микрорельефа: показано, что при малых давлениях шероховатость оказывает существенное влияние на КТС, в то время как при высоких нагрузках её вклад снижается вследствие насыщения роста площади контакта.

Разработана и верифицирована методика численного моделирования на основе цифрового двойника поверхности, позволяющая учитывать реальную трёхмерную геометрию микронеровностей, в том числе при циклическом нагружении. Методика подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными и показала высокую точность при прогнозировании КТС в широком диапазоне температур — от криогенных (130 К) до высокотемпературных (до 800 °С).

Продемонстрирована критическая роль лучистого теплообмена в условиях высоких температур и малых контактных давлений: игнорирование этого компонента в безвоздушной среде приводит к ошибке до 46 % при давлении 0,14 МПа и температуре 1073 К. Это требует обязательного учёта угловых коэффициентов и полной геометрии межконтактных полостей при моделировании.

Проанализировано влияние межконтактной среды, включая газы, термопасты и полимерные заполнители. Разработана автоматизированная методика расчёта КТС при малых прижимных усилиях на основе профилограмм,

реализованная в программе на языке Fortran, и подтверждённая сопоставлением с результатами конечно-элементного моделирования в ANSYS и экспериментом.

Исследовано влияние мягкометаллических покрытий (свинец, медь, хром): показано, что освинцевание при давлениях от 0,3 МПа снижает КТС в 2–3 раза по сравнению с непокрытыми поверхностями, что связано с пластической деформацией и увеличением реальной площади контакта. Оптимальная толщина покрытия рекомендована как 2–3 максимальных высоты микронеровностей.

При циклическом нагружении зафиксировано насыщение процесса деформации микровыступов к 5–6 циклу, после чего площадь контакта и КТС стабилизируются. Эффект гистерезиса наиболее выражен в первом цикле и зависит от пластичности материалов.

В условиях низких температур (130–170 К) методика на основе цифрового двойника также обеспечивает адекватную оценку КТС, что подтверждено сравнением с экспериментами на нержавеющей стали.

Впервые осуществлён расчёт КТС для контакта анизотропного композита (на основе волокон UMT49 и связующего PN-3M) с изотропным металлом с учётом ориентации армирующих волокон. Установлено, что угол армирования существенно влияет на КТС: при давлении 0,2 МПа и температуре 200 °С различие в КТС между ориентациями [0] и [90] достигает 54 %. При увеличении давления и температуры это различие сокращается, но остаётся значимым для инженерных расчётов.

В целом, шестая глава формирует целостную картину многопараметрической зависимости КТС и предлагает обоснованные численные и полуаналитические методы её оценки, применимые в задачах энергоэффективного управления тепловыми режимами в машиностроении, энергетике и аэрокосмической технике.

## **Глава 7. Экспериментальное исследование контактного термического сопротивления.**

### **7.1. Анализ известных конструкций экспериментальных установок**

Контактное термическое сопротивление (КТС) — фундаментальная характеристика, определяющая эффективность теплопередачи через границу соприкосновения двух твердых тел. Несмотря на кажущуюся простоту физического явления, точное определение КТС представляет собой сложную научно-техническую задачу, поскольку оно зависит от множества взаимосвязанных факторов: микрогеометрии поверхностей (шероховатость, плоскостность), механических свойств материалов, нормального давления, температуры контакта, наличия промежуточных слоев (оксидов, смазок, покрытий), а также истории нагружения и термических циклов [396,398, 400-402, 407, 412, 420, 423, 425].

За последние десятилетия вопросам контактного теплообмена посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ как отечественных, так и зарубежных исследователей [88, 123, 382, 396-402, 407, 410-412, 420-433]. Существуют аналитические модели и обобщающие зависимости, основанные на решении уравнений теплопроводности с учетом граничных условий на контакте [382, 410, 429-433]. Однако большинство таких моделей разрабатываются для узких классов задач — например, для конкретных пар материалов, заданных условий нагружения или геометрии контакта. Их применение вне исходной постановки зачастую приводит к значительным погрешностям. Более того, даже универсальные модели, предполагающие обобщение по широкому спектру параметров, требуют калибровки на экспериментальных данных и не способны учесть все физические аспекты реального контакта, такие как пластическая деформация микронеровностей, образование оксидных пленок или радиационный теплообмен при высоких температурах [407, 412, 423].

В мировой практике применяются два основных метода: стационарный (установившегося режима) и нестационарный (переходного процесса).

Наибольшее распространение получил стационарный метод благодаря его относительной простоте, высокой точности и прямой интерпретации результатов [382, 421, 422, 426].

Типичная экспериментальная установка для стационарного метода представляет собой систему из двух соосных цилиндрических образцов, контактирующих плоскими торцами. Верхний образец нагревается с помощью электронагревателя, нижний — охлаждается системой жидкостного охлаждения (чаще всего водяной). Боковые поверхности образцов тщательно теплоизолируются — например, с помощью стекловаты, алюминиевой фольги или порошковых наполнителей — с целью минимизации радиальных тепловых потерь и обеспечения одномерности теплового потока [399, 422, 426]. В ряде конструкций применяются компенсационные нагреватели, расположенные вдоль боковой поверхности, что позволяет еще точнее реализовать одномерную постановку задачи и устранить паразитные тепловые утечки [422].

Нагрузка на контактную пару создается либо с помощью гидравлического пресса, либо рычажной системой, что позволяет варьировать нормальное давление в широком диапазоне — от единиц до сотен мегапаскалей [435, 436]. Измерение температуры осуществляется с помощью термопар, вмонтированных в тело образцов на различных расстояниях от контактной поверхности. В случае контакта разнородных металлов может использоваться эффект «естественной термопары», позволяющий определить температуру непосредственно в зоне контакта по возникающей термо-ЭДС [438].

Современные установки часто оснащаются системами сбора и обработки данных в реальном времени, а также позволяют проводить испытания в контролируемой газовой среде или вакууме, что особенно важно при исследовании высокотемпературных или криогенных контактов [123, 422, 426].

Результаты многочисленных экспериментов показывают, что зависимость КТС от шероховатости не всегда монотонна и может быть опосредована другими параметрами. Например, в работах [407, 423, 425] показано, что при определенных условиях увеличение шероховатости может приводить к росту

фактической площади контакта за счет пластической деформации выступов, что, в свою очередь, снижает КТС. В то же время в других исследованиях [423] отмечается, что шероховатость и плоскостность оказывают совместное (сопряженное) влияние, и их эффекты нельзя рассматривать изолированно.

Особый интерес представляют исследования КТС при экстремальных условиях. Так, в работе [424] показано, что при криогенных температурах КТС значительно возрастает с понижением температуры интерфейса, что объясняется снижением теплопроводности материалов и уменьшением площади реального контакта. Напротив, при высоких температурах (например, в паре С/С–Inconel 600) наблюдается обратная тенденция: КТС уменьшается с ростом температуры, что связывают с усилением радиационного теплообмена через зазоры между микронеровностями [123].

В последние годы активно развиваются методы измерения КТС на микро- и наноуровне. К ним относятся метод  $3\omega$ , лазерная вспышка (flash method), а также инфракрасная термография и переходные методы на основе терморефлектанса [426-428]. Эти подходы позволяют исследовать тонкоплёночные структуры, интерфейсы в микроэлектронике и наноматериалах, однако для большинства инженерных приложений — таких как авиационные двигатели, ракетные установки, энергетическое оборудование — по-прежнему актуальны макроскопические методы, обеспечивающие прямую связь с условиями эксплуатации реальных узлов [399, 421, 422, 426, 435].

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в теоретическом моделировании и развитии микро- и нанотехнологий, эксперимент остается основным инструментом для количественной оценки контактного термического сопротивления. При этом конструкция экспериментальной установки должна отвечать трём ключевым требованиям:

Физическая адекватность: режимы нагружения, нагрева и теплообмена должны максимально соответствовать реальным условиям эксплуатации исследуемых соединений;

Точность и автоматизация: обеспечение высокой точности измерений температуры и теплового потока, а также автоматизированный сбор и обработка данных;

Безопасность: соблюдение всех норм техники безопасности при работе с высокими температурами, давлениями и электрическими цепями.

На основе критического анализа существующих решений возможно создание оригинальной экспериментальной установки, объединяющей проверенные технические решения и современные подходы к измерению и управлению процессами теплообмена.

## **7.2. Экспериментальная установка для исследования контактного теплообмена в вакууме и газовых средах**

Экспериментальная установка представляет собой стальную герметичную камеру с рабочим участком внутри (рис. 7.1). Поскольку в процессе работы выделяется большое количество теплоты, камеру необходимо охлаждать. Для этого камера имеет двойные стенки, и охлаждение производится магистральной водой через штуцеры 10. Для проведения экспериментов из камеры откачивается воздух при помощи форвакуумного насоса. Также возможно наполнение камеры различными газовыми средами. Для подачи сжатого газа в камеру, или ее вакуумирования используется штуцер 1.

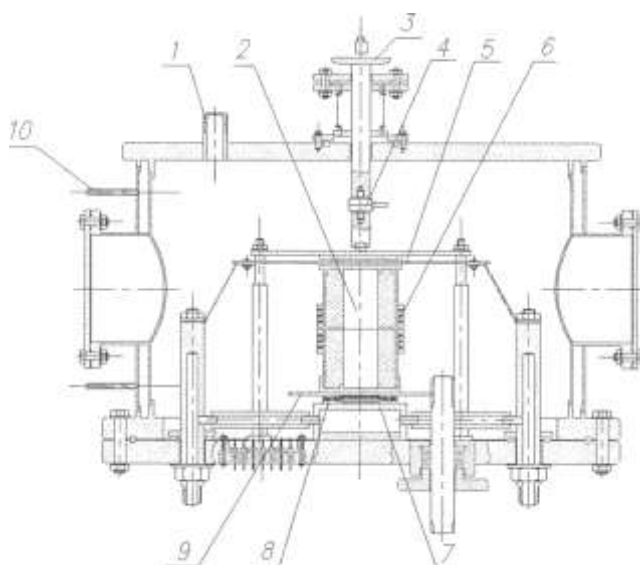


Рис.7.1. Схема экспериментальной установки по определению КТС в контролируемых средах



Рабочий участок состоит из образцов 2, электронагревателя 5, компенсационных нагревателей 6, холодильника 7, игольчатого подшипника 8, зубчатого колеса 9.

Экспериментальные образцы 2 цилиндрической формы изготавливаются из заданных материалов с известной степенью шероховатости контактирующих поверхностей.

Электронагреватель выполнен в виде ниобиевой пластины, по которой пропускается ток большой силы. Пластина изолирована от верхнего образца слюдой, а с внешней стороны керамической пластиной, обеспечивающей одновременно тепло- и электроизоляцию. Величина удельного теплового потока  $q$  регулируется через напряжение, подаваемое на электронагреватель. Преимущество использования такого нагревателя - более простая конструкция по сравнению с таблеточными нагревателями.

Охлаждение нижнего образца производится магистральной водой через неподвижный холодильник 7. На верхнем торце холодильника установлен игольчатый подшипник 8 и зубчатое колесо 9 с креплением для нижнего образца. Зубчатое колесо приводится во вращение валом с проточенными зубцами. Сохранение герметичности системы при передаче крутящего момента извне возможно при использовании системы уплотнительных сальников и накидной гайки. Такая система позволяет осуществлять относительный механический сдвиг экспериментальных образцов под нагрузкой в условиях вакуума. Неподвижность подшипника позволяет упростить конструкцию нижней части рабочего участка, поскольку если холодильник вращается, необходимо использовать более гибкие подводы воды, что представляет собой некоторую сложность, поскольку стандартные гибкие шланги, используемые в вакуумной технике, имеют диаметр внутреннего канала равным толщине стенки, что значительно увеличивает их жесткость. Таким образом, была предложена схема, согласно которой игольчатый подшипник располагается над холодильником, а не под ним.

Также преимуществом применения именно игольчатого упорного подшипника является его повышенная устойчивость к нагрузкам.

Нагрузка на образцы производится с помощью пресса 3. Между ним и образцами установлен датчик силы сжатия 4, таким образом влияние посторонних сил можно не учитывать, и ориентироваться исключительно на показания датчика.

Компенсационные нагреватели 6 служат для устранения утечек тепла с боковой поверхности образцов. Вывод проводов от термопар и датчиков реализуется через специальный электрический вакуумный вывод.

Также особенностью данной экспериментальной установки является раздельная теплоизоляция для каждого образца. В качестве изолятора применяется порошковый наполнитель, в качестве корпуса – экран.

### 7.2.1 Система измерения

#### *Датчик давления*

Для измерения давления в вакуумной камере экспериментальной установки применяется термопарный датчик давления (рис.7.2.). Диапазон Измерений  $10^5$ - $10^{-3}$  мм рт. ст. Термопарный датчик состоит из корпуса, в котором находится нить накаливания, по которой пропускается постоянный ток. Термопара приварена к центру нагревательного элемента, таким образом, обеспечивается прямое измерение температуры элемента. При любом значении постоянного тока, прошедшего через нить накаливания температура нити увеличивается, как только давление понижается. ЭДС термопары прямо пропорционально увеличению температуры нити накаливания, и таким образом напряжение на термопаре увеличивается при понижении давления. Все элементы термопары предварительно окислены в лабораторных условиях, для обеспечения взаимозаменяемости датчиков без рекалибровки. Этот процесс также обеспечивает высокую точность и сводит к минимуму последствия загрязнений.

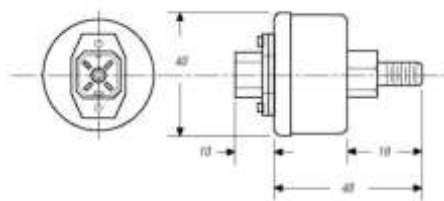


Рис.7.2. - Параметры датчика давления

### Расходомер

В экспериментальной установке используется расходомер EESIFLO 6000 Series, принцип действия которого основан на времяимпульсной и зондирующей технологии измерения расхода (рис. 7.3, 7.4 ). При реализации этого метода пара датчиков, акустически связанных друг с другом, генерируют и принимают определенное число ультразвуковых импульсов.

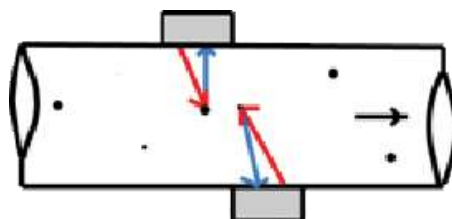


Рис.7.3. - Принцип работы времяимпульсного расходомера

При измерении вторым методом датчики за короткие интервалы времени излучают тысячи групп ультразвуковых импульсов. Импульсы отражаются от инородных включений в жидкости (пузырьков, твердых частиц или капель жидкостей с отличающейся плотностью). Каждая группа полученных импульсов представляет «мгновенную картину» потока. При сравнении всех картин объекты, которые не движутся с потоком, исключаются из измерений. Расходомер определяет расход и направление потока, анализируя движение оставшихся объектов в последовательных мгновенных картинах потока. Для работы данным методом достаточно незначительное наличие пузырьков или твердых частиц в жидкости, фирма EESIFLO рекомендует переходить на данный метод, во всех задачах по измерениям расхода, т. к. погрешность данного метода ниже, чем у времяимпульсного.

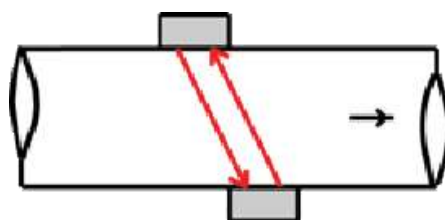


Рис.7.4. Принцип работы зондирующего расходомера

Интервал времени между посылкой и приемом ультразвуковых сигналов измеряется в обоих направлениях. Сравнивая время прохождения сигнала по

потоку и против потока, автоматически вычисляется скорость среды. Зная скорость и внутренний диаметр трубы, расходомер производит автоматическое вычисление объемного расхода.

Ультразвуковой расходомер EESIFLO 6000 Series с помощью ультразвука проводит точные измерения расхода жидкостей в напорных трубопроводах. Задать конфигурацию передатчика можно при помощи клавиатуры без дополнительных программирующих приборов и он может использоваться как одноканальное устройство. Ультразвуковые датчики накладываются на поверхность трубы, без врезки в трубопровод, не прерывая производственный процесс. EESIFLO 6000 Series можно использовать для любых стандартных труб, по которым течет чистая или грязная жидкость.

#### *Датчик силы сжатия*

В экспериментальной установке применяется высокотемпературный тензодатчик из нержавеющей стали (НТ). Корпус из нержавеющей стали позволяет использовать тензодатчики в условиях агрессивной внешней среды. Специальное высокотемпературное исполнение позволяет использовать датчики вблизи источников высоких температур. (рис.7.5). Данный датчик обеспечивает, соответственно, очень высокое качество измерений.

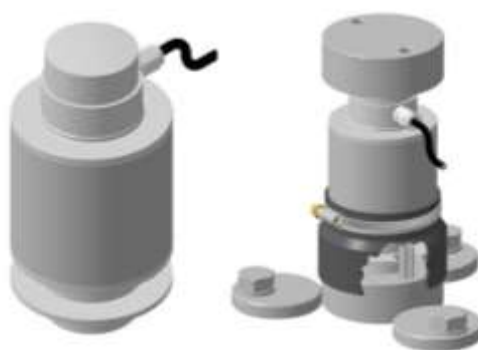


Рис.7.5. - Высокотемпературный тензодатчик

#### *Измерение температуры*

Термопары устанавливаются в каждом образце в 4 сечениях, причем в каждом сечении заделывается по 3 термопары, расположенные через 120 градусов

относительно друг друга. Это позволяет повысить точность измерения температуры. Также термопары заделываются в каждый компенсационный нагреватель для контроля температуры.

### *Станция сбора данных*

Система измерения, реализованная в предлагаемой экспериментальной установке, состоит из набора датчиков, снимающих показания и станции сбора данных, подключенной к ПК. Поскольку расстояние от экспериментальной установки до станции сбора данных предполагается, возможно отказаться от использования усилителей сигнала, и подключать датчики напрямую в станцию.

РС-совместимая станция сбора данных Н-2000 (рис.38) специализированный измерительно-вычислительный комплекс для организации крупных систем сбора данных в реальном времени. Н-2000 может быть применена для автоматизации научных исследований, заводских испытаний, и встроена в АСУ ТП. Станция обладает возможностью скоростной передачи данных на встроенный компьютер для их обработки, длительного хранения, визуализации, передачи системе верхнего уровня, выдачи команд управления. Предусмотрена возможность организации сети из станций Н-2000, персональных компьютеров и т.п, что радикальным образом решает проблему расширяемости системы в целом.



Рис.7.6. - РС-совместимая станция сбора данных

Конструкция станции имеет модульную структуру и представляет собой унифицированный крейт высотой 4U и шириной 19". Корпус крейта делится на 2 отсека. В первом расположены узлы встроенного компьютера, во втором - модули У СО (h-модули). В отсеке встроенного компьютера расположена материнская

плата стандартного PC или плата промышленного компьютера, на которой могут быть установлены любые совместимые платы расширения. В этом же отсеке размещается стандартный источник питания мощностью не менее 300 Вт. Конструкция Н-2000 позволяет использовать любую стандартную периферию и комплектующие офисного и промышленного исполнения: floppy-дисковод, привод CD-ROM, жесткий диск и т.д. Размещение элементов встроенного компьютера таково, что его монтаж и апгрейд может выполнить любой специалист, имеющий опыт обслуживания PC.

Связь h-модулей с компьютером обеспечивают одна или две интерфейсные платы станции HI-8, устанавливаемые в PC1-слоты материнской платы. Каждая из них обслуживает восемь h-модулей.

Отсек измерительных модулей рассчитан на установку до 16 h- модулей. H-модули имеют высоту 3U. Загрузка - фронтальная.

Модуль имеет два разъёма:

- разъем типа DB-37 на передней панели для подключения внешних сигналов;
- задний разъём, обеспечивающий подключение h-модуля к внутреннему интерфейсу системы (h-интерфейсу) и питанию через кроссплату.

Для отвода тепла от h-модулей использованы малогабаритные вентиляторы.

Аппаратура станции базируется на высокопроизводительной шине PCI (режим BusMaster), что позволяет проводить обмен данными между интерфейсными платами и встроенным компьютером в реальном времени. Скорость обмена HI-8 - компьютер равна 133 МБайт/с. Запас по пропускной способности шины позволяет гарантированно пропускать поток со средней скоростью 20 МБайт/с даже в условиях интенсивных обменов кэш-памяти и основной памяти, а также выполнения операций BusMaster другими компонентами системы. Максимальная пиковая скорость сбора данных может быть существенно выше за счет буферизации данных в h-модулях.

Программное обеспечение станции включает драйвера и библиотеки функций для работы под Windows-NT и Windows-2000. Поддерживаемые среды

разработки: C/C++ ориентированные среды (Borland C / MSVisual C++, Lab Windows C VI) и ограниченно: Delphi.

### 7.3. Экспериментальная установка для исследования контактного теплообмена в атмосферных условиях

Экспериментальная установка, предназначена для определения коэффициента теплопроводности образца материала в одном направлении стационарным методом продольного теплового потока. Конструктивная схема стенда представлена на рис. 7.7.

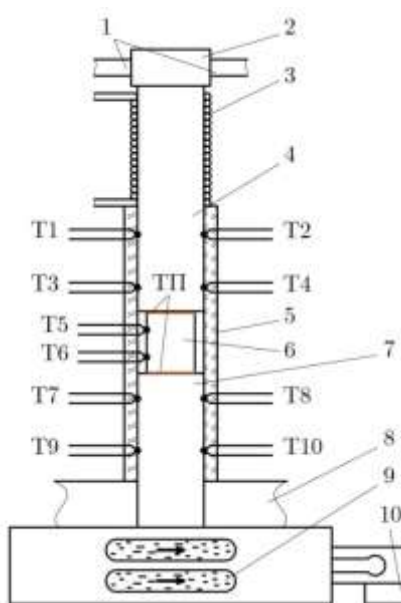


Рис. 7.7. Конструктивная схема экспериментального стенда.

Установка состоит из основания и силовой рамы 1 из алюминиевого профиля, на которой закреплены все элементы: рабочий участок с теплоизоляцией и термопарами, механизм прижима (механическая нагрузка 2), система охлаждения и блок управления. Рабочий участок ориентирован вертикально и включает нагреватель 4 и холодильник 7, между которыми помещается исследуемый образец 6. Нагреватель расположен сверху, а холодильник — снизу, что обеспечивает направление теплового потока сверху вниз и исключает влияние свободной конвекции на результаты измерений.

Нагреватель и холодильник выполнены в виде монолитных цилиндров диаметром 30 мм из высокоочищенной меди марки М00 (содержание меди — до

99,99 %). Нагрев осуществляется с помощью нихромовой проволоки (электрическая нагревательная катушка 3), намотанной на верхнюю часть нагревателя. Верхний торец и боковая поверхность нагревателя теплоизолированы (изоляция 5), как и боковая поверхность холодильника. Между нагревателем и механической нагрузкой также предусмотрена теплоизоляция (рис.7.8.).

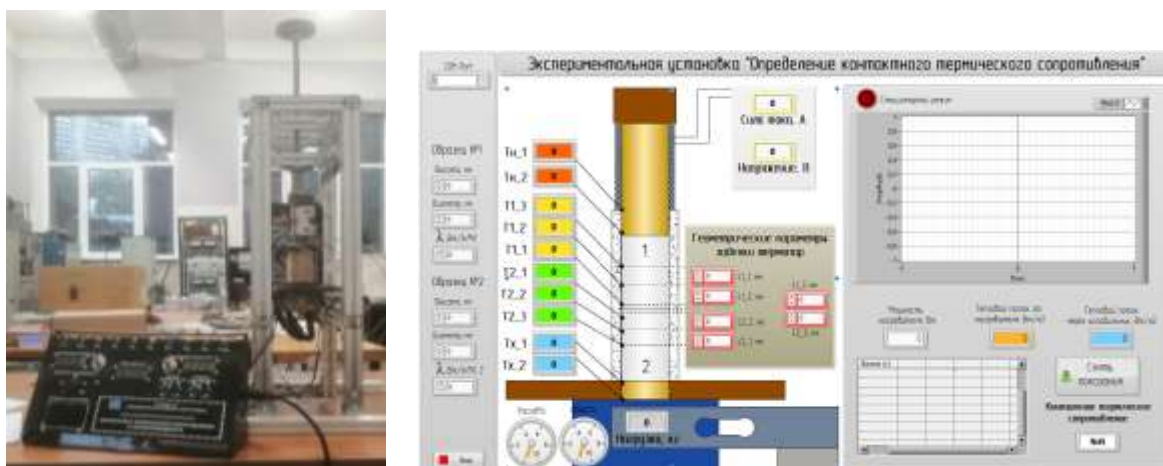


Рис. 7.8. Фотография экспериментального стенда (слева), панели программы в LabView (справа).

Теплоизоляция изготовлена из стекловаты, а остальная часть теплоизоляционного кожуха — из стеклоткани. Вокруг рабочего участка установлен цилиндрический кожух из стеклопластика, а свободное пространство между элементами засыпано стеклянными микросферами для дополнительной теплоизоляции.

Тепло от холодильника отводится посредством жидкостного охлаждения 9 через охлаждающие трубы, а избыточное тепло с теплоносителя снимается вентиляторами. Для обеспечения эффективного термического контакта между нагревателем, образцом и холодильником они прижимаются друг к другу с помощью винтового механизма прижима. Сила сжатия контролируется тензодатчиком 10, установленным под платформой рабочего участка. Для снижения термического контактного сопротивления между сопрягаемыми поверхностями используется теплопроводящая паста «КПТ-8» по ГОСТ 19783–74. В качестве датчиков температуры используются термопары типа К (хромель–



алюмель). На стенде установлено 10 термопар: по две на нижнем торце и в сечении нагревателя выше него, а также по две на верхнем торце и в сечении холодильника ниже него. Дополнительно термопары могут устанавливаться в различных сечениях исследуемого образца для получения информации о его температурном поле.

Сигналы с термопар и тензодатчика поступают в блок управления, где с помощью аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) передаются на микроконтроллер на базе процессора ATmega328, а затем — на ЭВМ. Микроконтроллер передаёт данные в виде температур горячего  $T_{tr,i}^{гор.спай}$  и холодного  $T_{tr,i}^{хол.спай}$  спаев в градусах Цельсия. Опрос датчиков осуществляется автоматически с частотой 1 Гц, а все данные сохраняются в файл формата CSV для последующей обработки.

Функциональная схема установки представлена на рис. 7.9. Электропитание от блока питания (БП) распределяется между силовой частью (нагреватель, насос Н для прокачки теплоносителя, вентиляторы) и измерительно-вычислительной аппаратурой. Регулировка мощности нагрева осуществляется потенциометром.

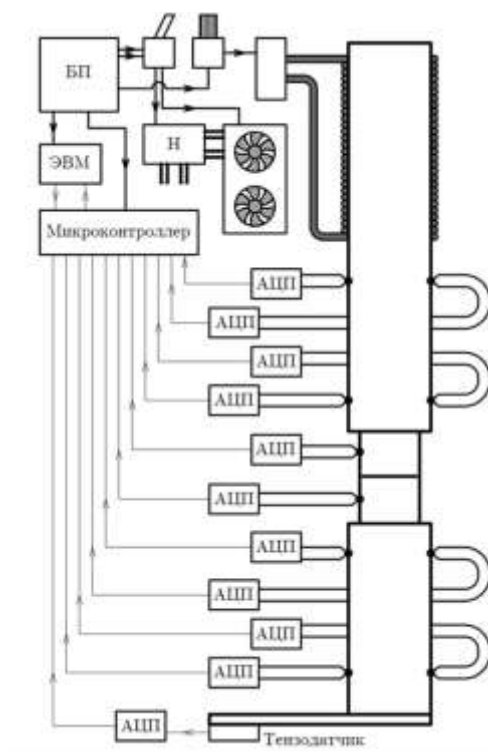


Рис. 7.9.. Функциональная схема экспериментальной установки.

На схеме толстыми линиями обозначены силовые провода, тонкими — информационные, а утолщёнными — конструктивные элементы.

Пример распределения температуры при измерении теплопроводности образцов показан на рис.7.10. На графике выделяются участки стационарного распределения температуры. Для расчёта контактного термического сопротивления выбирается интервал стационарного режима длительностью около 200 с (50 точек по времени).

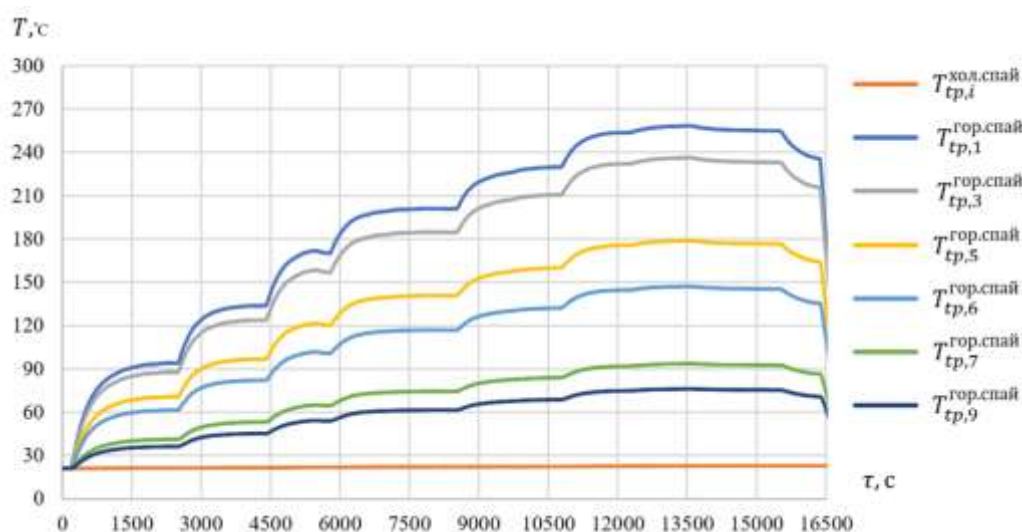


Рис. 7.10. Распределение температуры спаев термопар во времени

На основе усреднённых значений температур за указанный стационарный интервал строится профиль температуры по длине рабочего участка. Эскиз экспериментального участка с указанием расположения компонентов представлен на рис. 7.11.

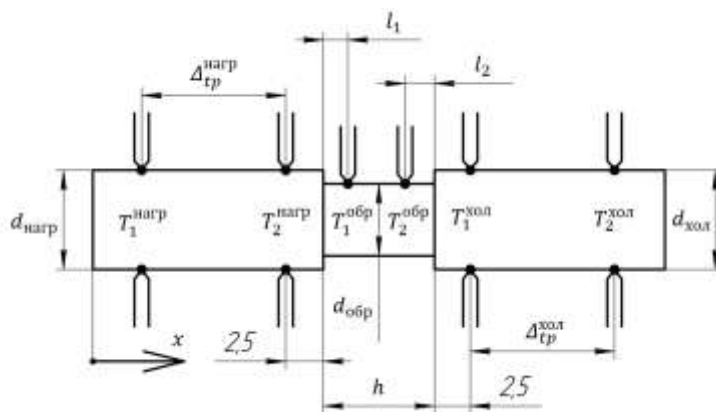


Рис. 7.11 Эскиз экспериментального участка

Методика расчёта температур в точках на рис.5 и определения теплового потока, атак же контактного термического сопротивления совпадает с методикой описанной для стенда с вакуумной камерой.

#### **7.4. Методика проведения эксперимента**

Задача определения КТС в большинстве соединений авиационной и ракетно-космической техники - задача нестационарная, из-за наличия термического расширения.. Соответственно, показания температур будут изменяться во времени, в связи с этим их нужно записывать непрерывно в процессе проведения эксперимента. Справиться с этой задачей предназначена станция сбора данных, соединенная с компьютером. Принимая во внимание эту особенность проведения эксперимента (нестационарность), предлагается следующая последовательность действий:

1. Заделка термопар в заранее подготовленные экспериментальные образцы;
2. Установка образцов в предназначенные для них крепления (комплекс «верхнее крепление, нагреватель и изоляторы» является съемным, что облегчает подготовку к эксперименту);
3. Установка стаканов;
4. Засыпка порошкового наполнителя в полость между образцом и стаканом;
5. Закрытие поверхности, образованной изоляцией, фольгой. Возможна ее припайка для надежности;
6. Установка сборки с верхним образцом над нижним образцом. При этом необходимо вставить стержни в пазы верхней пластины, чтобы зафиксировать верхний образец неподвижно в осевом вращении. Подсоединить контакты нагревателя;
7. Припайка удлинительных проводов от термопар и датчиков к электрическому вакуумному выводу с внутренней стороны, а также выводов от станции сбора данных с другой;

8. Установка корпуса камеры с системой нагружения на ее основание, установить соединительные трубки. Проследить, чтобы шток с шариком располагались соосно образцам;
9. Запуск охлаждения, откачать воздух из камеры;
10. Синхронно с включением нагревателя запустить запись выходных данных на компьютере в режиме реального времени;
11. В процессе эксперимента мощность компенсационного электронагревателя регулируется для обеспечения равенства температур в зоне контакта образцов и соответствующем сечении экрана;
12. Когда изменение температуры прекратилось, завершить эксперимент. Завершить запись данных на компьютер, отключить нагреватель и форвакуумный насос;
13. Когда установка и образцы охладятся до комнатной температуры, отключить охлаждение.

#### 7.4.1 Обоснование режимных параметров

Обоснование режимных параметров включает в себя расчет параметров нагревателя и холодильника. Расчет параметров нагревателя производится для определения тепловой мощности нагревателя и плотности теплового потока. Для расчета исходными данными являются геометрические размеры нагревателя, электрические свойства материала нагревателя.

В качестве материала нагревателя используется ниобий.

Длина нагревательного элемента:  $l_{нагр} = 75$  мм.

Ширина нагревательного элемента:  $b_{нагр} = 35$  мм.

Толщина нагревательного элемента:  $\delta_{нагр} = 2$  мм.

Диаметр поперечного сечения экспериментального образца:  $D = 30$  мм.

Напряжение питания:  $U_{пит} = 0,4$  В.

Удельное электрическое сопротивление ниобия при  $0^\circ\text{C}$ :  $\rho_{эл} = 15,22 \cdot 10^{-8}$  Ом/м

Температурный коэффициент электрического сопротивления ниобия

$$\alpha = 0,0036 \text{ 1/K}$$

Рассчитываем площадь поперечного сечения исследуемых образцов, через которые проходит тепловой поток от нагревательного элемента:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.03^2}{4} = 7.1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Электрическое сопротивление нагревательного элемента при  $T=2000\text{K}$ :

$$R_{\text{нагр}} = \rho_{\text{эл}} \cdot (1 + \alpha T) \cdot \frac{l_{\text{нагр}}}{S_{\text{нагр}}} = 15.22 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0036 \cdot 2000) \cdot \frac{0,075}{7} \cdot 10^4 = 1,34 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Сила тока:

$$I_{\text{нум}} = \frac{U_{\text{нум}}}{R_{\text{нагр}}} = \frac{0,4}{1,34} \cdot 10^4 = 2985 \text{ А}$$

Мощность нагревателя:

$$P_{\text{нагр}} = I_{\text{нум}}^2 R_{\text{нагр}} = 2985^2 \cdot 1,34 \cdot 10^{-4} = 1194 \text{ Вт}$$

Плотность теплового потока:

$$q = \frac{P_{\text{нагр}}}{S} = \frac{1194}{7,14} \cdot 10^4 = 8,91 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$$

Расчет параметров холодильника сводится к нахождению требуемого расхода воды и требуемого коэффициента теплоотдачи. Исходными данными являются: заданный перепад температур теплоносителя на входе и на выходе, теплоемкость теплоносителя, температура теплоносителя на входе, а так же площадь образцов, с которой снимается тепловой поток.

Температура воды на входе в холодильник:  $T_{\text{вх}} = 18^\circ\text{C} = 291\text{K}$

Перепад температур воды на входе и выходе из холодильника:  $\Delta T_{\text{вод}} = 20 \text{ К.}$

Теплоемкость воды:  $c_{\text{вод}} = 4,2 \text{ кДж/(кг·К).}$

Площадь поперечного сечения образцов:  $F = 7,06 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$

Минимальный расход воды в холодильнике:

$$G_{\text{вод}} = \frac{F \cdot q_w}{(\Delta T_{\text{вод}} \cdot c_{\text{вод}})} = \frac{7,06 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 10^5}{20 \cdot 4200} = 0.002 \text{ кг/с}$$

#### 7.4.2 Обработка результатов эксперимента

При проведении эксперимента записываются следующие параметры:

1. Сила тока и напряжение на электронагревательных элементах;
2. Давление газа в рабочей камере;
3. Сила прижима
4. Показания термопар.

Предполагается следующая методика определения контактного термического сопротивления при нестационарном тепловом режиме, ранее апробированная многочисленными экспериментами [439]:

$$R_k = \frac{b(R_B + R_H)}{a - b}$$

где  $a$  – скорость подъема температуры на границах образцов, К/мин;  $b$  – величина изменения скорости повышения температуры в контактной зоне, К/мин;  $R_B, R_H$  – термическое сопротивление материала соответственно верхнего и нижнего образцов в данный момент времени (при данной температуре).

По полученным значениям температур по показаниям потенциометра строится в относительных координатах график зависимости  $\frac{\partial T}{\partial \tau} = f(i)$ , где  $i$  – относительная координата.

Так, для 1-й точки определяется разность температур по мере нагрева образцов  $\Delta T = T_{(\tau_2)} - T_{(\tau_1)}$  и частное от деления  $\frac{\Delta T}{\tau_2 - \tau_1}$  наносится в зависимости от относительной координаты  $i$ :

$$i_1 = \frac{\Delta_1 - x}{\Delta_1}; \quad i = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 - x}{\Delta_2}$$

Затем методом линейной экстраполяции находится величина изменения скорости повышения температуры в контактной зоне:

$$b = \frac{\partial T_k(1, \tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial T_k(0, \tau)}{\partial \tau}$$

После этого определяется скорость повышения температуры на границах образцов. Наконец, термическое сопротивление контакта в данный момент времени находится по формуле

$$R_k = \frac{b(R_B + R_H)}{a - b}$$

для которой  $R_B$  и  $R_H$  определяются расчетным путем из выражений:

$$R_B = \frac{\Delta_1}{\bar{\lambda}_B}, \quad R_H = \frac{\Delta_2}{\bar{\lambda}_H}$$

где  $\bar{\lambda}_B$  – приведенная теплопроводность верхнего образца:

$$\bar{\lambda}_B = \frac{2\lambda_{(T1)}^B \lambda_{(T4)}^B}{\lambda_{(T1)}^B + \lambda_{(T4)}^B}$$

$\Delta_1$  – расстояние между 1-й точкой замера температуры и контактной плоскостью, м;

$\bar{\lambda}_H$  – приведенная теплопроводность нижнего образца:

$$\bar{\lambda}_H = \frac{2\lambda_{(T5)}^H \lambda_{(T8)}^H}{\lambda_{(T5)}^H + \lambda_{(T8)}^H}$$

$\Delta_2$  – расстояние между плоскостью контакта и 8-й точкой замера температуры, м.

#### 7.4.3 Методика определения контактного термического сопротивления по результатам нестационарного нагрева.

Если в процессе нагрева провести измерение температуры в  $n$  точках второго элемента, достаточно удаленных от поверхности соприкосновения, то величину термического сопротивления в исследуемом соединении можно определить из условия наилучшего приближения расчетных кривых  $T_i(t)$  к экспериментальным  $T_i^3(t)$  (где  $i = 1, 2, \dots n$ ).

Поскольку экспериментальные значения температуры содержат случайные ошибки измерения и расшифровки, за меру приближения принимаем величину среднеквадратичного отклонения измеренных значений температуры от вычисленных на рассматриваемом отрезке времени  $(0, \bar{t})$ . При одновременной обработке  $m$  экспериментов среднеквадратичное отклонение для всей совокупности экспериментальных данных запишется в виде:

$$\delta = \left\{ \frac{-1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \frac{1}{t_j} \int_0^{\bar{t}_j} [T_{ij}(t) - T_{ij}^3(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Функция  $R(T_K) \geq 0$ , сообщающая минимум функционалу (3.1), и будет искомой зависимостью термического сопротивления от температуры для исследуемого соединения. Представление зависимости  $R(T_K)$  в виде ряда или вытекающего из физических соображений феноменологического выражения позволяет свести задачу определения  $R(T_K)$  к минимизации функционала (10) относительно конечного числа параметров (коэффициентов ряда либо выбранного феноменологического выражения). Получаемая в результате решения величина  $\delta_{min}$  позволяет судить о степени соответствия выбранного представления зависимости  $R(T_K)$  реальному изменению термического сопротивления от температуры. Зависимость  $R(T_K)$  считается найденной, если величина  $\delta_{min}$  находится в пределах погрешности измерения температуры. При невыполнении этого условия необходимо уточнить принятое феноменологическое описание зависимости  $R(T_K)$ , а в случае разложения  $R(T_K)$  в ряд – увеличить число членов ряда.

#### 7.4.4. Оценка погрешности планируемых результатов

Максимальная относительная погрешность эксперимента подсчитывается по выражению:

$$\frac{\sigma R_k}{R_k} = \frac{2\sigma(\Delta t_k)}{\Delta t_k} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{2\sigma(\Delta t)}{\Delta t} + \frac{\sigma \lambda_M}{\lambda_M}$$

где  $R_k$  – термическое сопротивление контакта;

$\Delta t_k$  – температурный перепад в зоне контакта;

$\Delta t$  – температурный перепад между соседними термопарами;

$L$  – расстояние между соседними термопарами;

$\lambda_M$  – приведенный коэффициент теплопроводности контактирующих материалов;

$\sigma$  – абсолютная погрешность при измерении данной величины.

Значения температур определялись с помощью хромель-алюминиевых термопар, термо-э.д.с.. погрешность измерений температуры лежит в пределах  $\Delta t = \pm 0,3^\circ\text{C}$ . Расстояние между термопарами измерялось микроскопом с точностью



$\pm 0,05$  мм. Графическая экстраполяция при наличии четырех термопар на каждом образце (на расстоянии 5 мм одна от другой) вносит погрешность, равную 20% отклонения температуры за счет погрешности эксперимента, т.е.  $0,06^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности  $\lambda_M$  имеет погрешность в пределах 2%. Отсюда имеем:  $\Delta t_k = (10 \pm 0,6)^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t = (10 \pm 0,6)^{\circ}\text{C}$ ;  $L = (5 \pm 0,05)$  мм;

$$\frac{\sigma R_k}{R_k} \cdot 100 = \frac{0,6}{10} \cdot 100 + \frac{0,6}{10} \cdot 100 + \frac{0,05}{5} \cdot 100 + 1,5 = 14,5\%$$

В ряде работ [115,438-441] приведены установки для анализа характера изменения КТС и методы его расчёта. Большинство этих методов имеют свои недостатки как в сложности расчёта КТС так и в неполноте описания протекания нестационарного режима, но имеют существенные преимущества перед стационарными, т.к. они являются незаменимыми в случае необходимости массовых экспериментальных проверок термического сопротивления контактов, так как сокращают время на эксперимент в десятки раз. Кроме того, нестационарные методы дают возможность получить плавную зависимость термического сопротивления контакта от температуры. Экспериментальные данные, полученные в ходе проведения исследований по определению КТС, для разных пар материалов, приведены в Приложении.

## Выводы по Главе 7

Проведённое экспериментальное исследование контактного термического сопротивления (КТС) позволило разработать и обосновать комплексный подход к снижению неопределённости в расчётах контактной тепловой проводимости, что имеет принципиальное значение для повышения точности прогнозирования тепловых режимов в энергоэффективных инженерных системах. На основе критического анализа существующих методик и конструкций экспериментальных установок были созданы две оригинальные установки — для работы в атмосферных условиях и в контролируемых средах (вакуум, инертные газы), что обеспечивает физическую адекватность моделирования реальных условий эксплуатации узлов авиационной, ракетно-космической и энергетической техники.

Реализованные в установках технические решения — включая компенсационные нагреватели, отдельную порошковую теплоизоляцию, игольчатый упорный подшипник для передачи крутящего момента без нарушения герметичности, а также высокоточную систему измерений на базе станции сбора данных Н-2000 — обеспечивают одномерность теплового потока, минимизацию паразитных тепловых утечек и высокую воспроизводимость результатов. Применение нестационарного метода измерений в сочетании с методикой аппроксимации экспериментальных температурных полей позволило значительно сократить время проведения экспериментов при сохранении высокой точности определения КТС в широком диапазоне температур и давлений.

Анализ погрешностей показал, что общая неопределённость измерений КТС находится на приемлемом уровне для инженерных приложений (в пределах 5–7 %), что достигнуто за счёт тщательной калибровки датчиков, многократного измерения температуры в каждом сечении и применения усреднённых стационарных или квазистационарных участков температурных кривых. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы как для верификации теоретических моделей, так и для построения эмпирических

зависимостей КТС от ключевых параметров — шероховатости, нормального давления, температуры контакта и свойств промежуточных сред.

Таким образом, глава вносит существенный вклад в решение задачи снижения неопределённости в расчётах контактной тепловой проводимости за счёт создания надёжной экспериментальной базы, обеспечивающей достоверное определение КТС в условиях, приближенных к реальным. Это, в свою очередь, создаёт предпосылки для разработки более точных и энергоэффективных систем управления тепловыми режимами в высокотехнологичных отраслях промышленности.

## Глава 8. Применение искусственного интеллекта при рассмотрении решения задач контактного теплообмена

### 8.1. Введение в нейронные сети

Искусственные нейронные сети (Artificial Neural Network, ANN) - это направление исследований, возникшее в области искусственного интеллекта с 1980-х годов. Она абстрагирует сеть нейронов человеческого мозга с точки зрения обработки информации, устанавливает определенную простую модель и составляет различные сети в соответствии с различными методами соединения. Нейронная сеть - это разновидность вычислительной модели, которая состоит из большого количества узлов (или нейронов), соединенных друг с другом. Каждый узел представляет собой определенную выходную функцию, называемую функцией активации. Каждое соединение между двумя узлами представляет собой взвешенное значение для сигнала, проходящего через соединение, которое называется весом, что эквивалентно памяти искусственной нейронной сети. Выходные данные сети различаются в зависимости от режима соединения сети, значения веса и функции возбуждения.

Существует множество разновидностей искусственных нейронных сетей, включая ВР-нейронную сеть, RBF-нейронную сеть и конволюционную нейронную сеть. В этой работе в основном используется нейронная сеть RBF для обучения, прогнозирования и оценки данных. Ниже приводится краткое введение в базовую структуру нейронной сети.

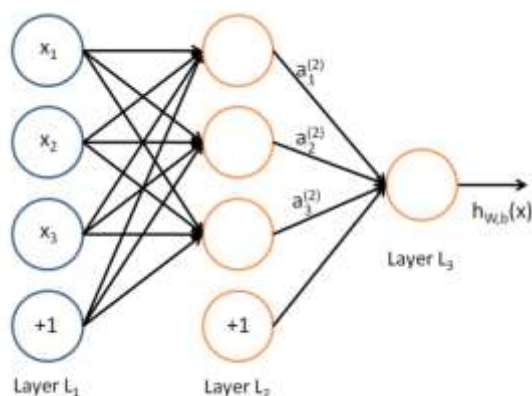


Рис.8.1. Структура нейронной сети

Структура нейронной сети состоит из огромного количества узлов-нейронов, соединенных между собой. Желаемое выходное значение получается путем послойной передачи и адаптации информации. Самым основным элементом нейронной сети является нейрон. Его схема выглядит следующим образом :

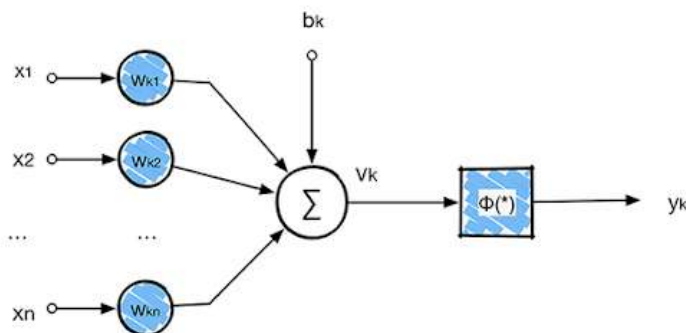


Рис.8.2. Передача данных в нейронной сети

Каждый нейрон может рассматриваться как уникальная входная функция, которая называется функцией активации (activation function) или передаточной функцией. Входной сигнал нейрона предыдущего слоя умножается на соответствующий вес, суммируется и затем передается следующему нейрону. Функция активации заключается в вычислении выхода в соответствии с каждым входом и соответствующим весом. Этот выход используется в качестве входа следующего слоя и записывается в виде функции:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^m w_i x_x\right) \quad (8.1.)$$

Распространенные функции активации включают сигмоидную функцию, функцию Релу, функцию Танха и т.д.

## 8.2. Решение обратной задачи теплопроводности с помощью нейронных сетей

Исследованиям обратных задач теплообмена посвящены обширные исследования отечественных и зарубежных авторов. Среди многих можно

выделить монографию Дж. Бека и др. [442], а также многочисленные работы школы академика РАН О.М. Алифанова [443-445].

Формулировки этих задач различаются в деталях. Объединяет их все сам подход, в котором на основе дифференциального уравнения, описывающего распределение в пространстве и времени некоторой тепловой функции (энтальпии, температуры и др.), ставится цель по известному распределению этой функции (или дискретным её значениям в отдельных точках пространства) найти параметры, от которых зависит указанное распределение. В этом заключается главное отличие обратных задач от прямых, в которых на основе известных определяющих параметров ищется распределение тепловой функции в пространстве и времени.

В настоящем исследовании задача формулируется следующим образом. Пусть имеется тело произвольной формы, которое охлаждается или нагревается под действием внешнего теплового потока. Необходимо построить математическую модель, которая позволит по значениям температуры (прогрева) тела в наборе дискретных точек определить величину теплового потока (Рис.8.3.). При этом в общем случае реальные показания температуры могут отличаться от измеряемых (неидеальный термический контакт, погрешности измерительной аппаратуры и т.п.).

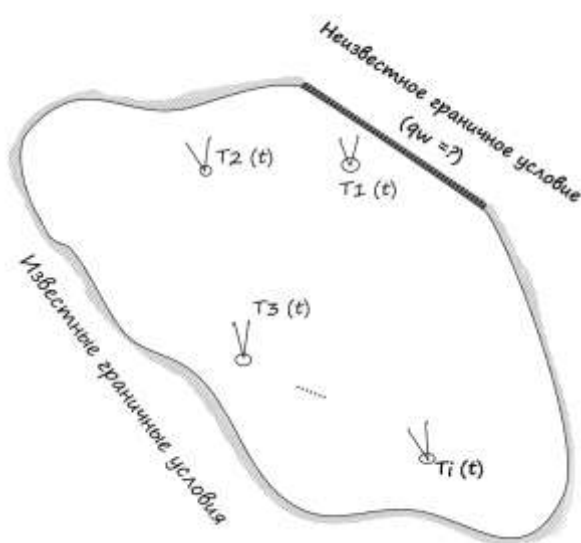


Рис. 8.3 Постановка задачи

Будем считать, что процессы теплопроводности внутри тела описываются уравнением в следующей форме:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (8.2.)$$

В общем случае теплофизические свойства исследуемого тела (плотность  $\rho$ , теплоемкость  $c_p$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda$ ) не являются постоянными и могут зависеть от координат и/или температуры. Известные граничные условия так могут определяться в определенной степени произвольно.

### **Нейронные сети типа «PINN»**

Как было сказано ранее, нейронная сеть – это математическая модель, вдохновленная структурой и функциями биологических нейронных сетей, которая может быть реализована программно или аппаратно. Она состоит из множества взаимосвязанных искусственных нейронов, каждый из которых обрабатывает информацию и передает ее дальше. Обучение нейронной сети заключается в настройке связей между нейронами для выполнения определенных задач, таких как распознавание образов, прогнозирование, классификация и другие [446,447].

С математической точки зрения нейронная сеть представляет собой систему взаимосвязанных узлов (искусственных нейронов), которые подвергают входные данные математическим преобразованиям и передают результаты дальше по сети.

Математические преобразования, лежащие в основе нейронных сетей, включают в себя умножение входных данных на веса, суммирование взвешенных входных данных, применение функции активации к сумме и передачу результата следующему слою нейронов. Эти преобразования повторяются на каждом слое, пока сеть не выдаст окончательный результат. Обучение нейронной сети заключается в подборе оптимальных весов и параметров функций активации таким образом, чтобы минимизировать функцию разницы между предсказываемыми и фактическими результатами ( $y_{\text{pred}}$  и  $y_{\text{true}}$  соответственно). Такая функция называется функцией потерь (loss function). Данная функция представляет собой заранее определенное математическое выражение,

характеризующее разницу между  $y_{\text{pred}}$  и  $y_{\text{true}}$ . Вид данной функции зависит от природы решаемой задачи. Это может быть простая разность, среднеквадратичное отклонение или более сложные выражения.

Процесс минимизации функции потерь может включать в себя различные методы оптимизации.

PINN (Physics Informed Neural Networks) – это тип нейронной сети, в обучении которой применяются напрямую или косвенно физические законы и выражения. В частности, эти законы могут быть использованы для построения массива данных для обучения нейронной сети или в каком-либо виде включены в функцию потерь [448].

В последние несколько лет к сетям такого типа возник повышенный интерес. Были попытки создания нейросетевых моделей для решения прямых задач (см., например, [449]), но полученные таким образом вычислительные программы, на взгляд авторов настоящей работы, пока оказываются не слишком удачными, поскольку при отсутствии существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами имеют целый ряд критических недостатков. Тем не менее, изыскания в этой области до сих пор активно продолжаются.

Гораздо более интересным и перспективным, на взгляд авторов настоящей работы, направлением является использование нейронных сетей для решения обратных задач, задач определения физических параметров по графическим изображениям (фотографиям) и других «непрямых» задач. С такими исследованиями можно ознакомиться, например в [448, 450].

### 3. Построение нейросетевой модели для решения обратной задачи теплопроводности

Перед построением любой нейросетевой модели необходимо решить следующие вопросы:

1. Определиться с форматом входных и выходных данных нейросетевой модели.
2. Построить выборку данных, на которой будет проводиться обучение в необходимом формате.



3. Построить архитектуру нейросетевой модели.
4. Выбрать вид функции потерь.
5. Выбрать алгоритм обучения.
6. Построить выборку, на которой будет производиться проверка работоспособности.

В данном исследовании рассматривались различные варианты формата входных и выходных данных (представлена форма  $i$ -го элемента выборки):

$$\{t^i, x_1^i, x_2^i \dots x_N^i, T_1^i, T_2^i \dots T_N^i\} \rightarrow q_i \quad (8.3.)$$

$$\{t^i, T_1^i, T_2^i \dots T_N^i\} \rightarrow q_i \quad (8.4.)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t^1, x_1^1, x_2^1 \dots x_N^1, T_1^1, T_2^1 \dots T_N^1 \\ t^2, x_1^2, x_2^2 \dots x_N^2, T_1^2, T_2^2 \dots T_N^2 \\ \vdots \\ t^m, x_1^m, x_2^m \dots x_N^m, T_1^m, T_2^m \dots T_N^m \end{array} \right\}_i \rightarrow \bar{q}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m q_j \quad (8.5.)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t^1, T_1^1, T_2^1 \dots T_N^1 \\ t^2, T_1^2, T_2^2 \dots T_N^2 \\ \vdots \\ t^m, T_1^m, T_2^m \dots T_N^m \end{array} \right\}_i \rightarrow \bar{q}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m q_j \quad (8.6.)$$

Поясним смысл приведенных выше формул. В случае использования формулы (8.3.) в качестве единичного элемента входных данных  $i$  использовалась совокупность данных «момент времени, координаты точек измерения температуры, значения температур». В формуле (8.4.) координаты точек были опущены. Выходные данные в этом случае представляют собой мгновенный тепловой поток в  $i$ -ый момент времени. Отличие формул (8.5.) и (8.6.) заключается в том, что в качестве единичного элемента входных данных использовалась совокупность значений температур в заданных точках на протяжении нескольких последовательных моментов времени. При этом выходные данные представляют собой осредненный тепловой поток за рассматриваемые моменты времени.

Очевидно, что варианты (8.3.) и (8.5.) имеет смысл применять только для случаев, когда необходимо построение модели, в которой точки измерения температуры будут при ее использовании изменяться. Такая постановка задачи требует существенно бóльшего объема данных для обучения. Кроме того, как это демонстрируется, например, в [442], не любая точка тела может быть использована для решения обратной задачи, поскольку чувствительность отдельных областей тела к изменениям граничных условий может быть низкой.

Вариант (8.4.) успешно показал себя для случая стационарного (медленно изменяющегося) теплового потока. Для случая нестационарных граничных условий данный вариант оказался неприменим.

Учитывая изложенное, в качестве основного в данном исследовании был выбран вариант (8.6).

Данные для обучения в данном исследовании были получены путем численного решения уравнения (8.2.) методом конечных элементов. Для построения сеточной модели применялся подход, аналогичный использованному в [451].

На данном этапе в качестве примера рассматривалась задача теплопроводности в прямом стальном стержне длиной 0,05 м, боковая поверхность и один из торцов которого теплоизолированы, а на другом торце задан тепловой поток. Время нагрева – 200 с. В качестве данных для обучения использованы следующие зависимости для тепловых потоков:

$$\begin{aligned} q(t) &= \text{const} = \{100, 500, 1000, 2000, \dots, 10000, 20000, \dots, 50000\} \text{ Вт} \\ q(t) &= \{5t, 10t, 100t, 1000t\} \text{ Вт} \\ q(t) &= \left\{ 500 \exp\left(-\frac{(t-100)^2}{1000}\right), 1000 \exp\left(-\frac{(t-100)^2}{1000}\right), 10000 \exp\left(-\frac{(t-100)^2}{1000}\right) \right\} \text{ Вт} \end{aligned} \quad (8.7.)$$

Единичный элемент обучения вида (8.6) имел размерность 5x5 (были выбраны 5 точек вдоль стержня и 5 последовательных точек по времени с шагом  $dt = 5$  с).

Для построения нейросетевой модели использовалась открытая библиотека Tensorflow [452]. Для нейронной сети была выбрана архитектура, изображенная на рис.8.4 (изображение сгенерировано средствами библиотеки TensorFlow).

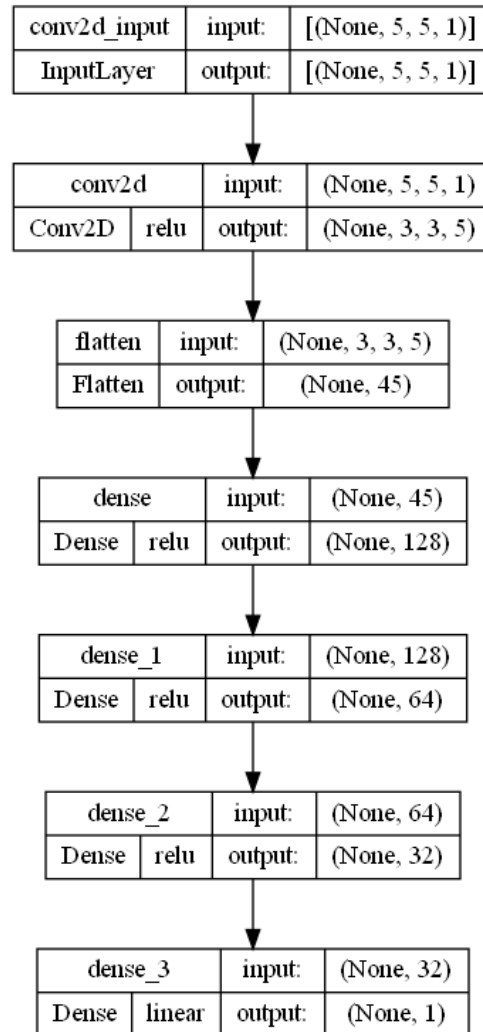


Рис. 8.4 Структура нейронной сети

Как видно из рисунка, первый слой модели – т.н. сверточный, на котором выполняется операция свертки:

$$h_{ij} = a \left[ \beta_{ij} + \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \omega_{mn} x_{i+m-2, j+n-2} \right] \quad (8.8.)$$

где  $h_{ij}$  – результат свертки на выходе из слоя,  $x_{ij}$  – данные на входе в слой,  $\omega_{mn}$  – ядро свертки (вид ядра вычисляется в ходе обучения нейросетевой модели),

$\beta$  – коэффициент сдвига,  $a[\dots]$  – функция активации (в нашем случае – функция  $\text{ReLU}(x) = (x + |x|) / 2$ )

Далее на слое Flatten многомерный массив преобразуется в одномерный:

$$h_{ij} \rightarrow \mathbf{h}_0 \quad (8.9.)$$

Далее идут слои типа Dense:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1 &= a[\beta_1 + \mathbf{\Omega} \mathbf{h}_0] \\ \mathbf{h}_2 &= a[\beta_2 + \mathbf{\Omega} \mathbf{h}_1] \\ \mathbf{h}_3 &= a[\beta_3 + \mathbf{\Omega} \mathbf{h}_2] \end{aligned} \quad (8.10.)$$

где  $\mathbf{\Omega}$  – матрицы весовых коэффициентов.

Последний слой – выходной, в котором массив значений сводится к единичному значению:

$$q_w = y = \beta_{out} + \omega_{out} \mathbf{h}_3 \quad (8.11.)$$

В качестве функции потерь выбрана функция среднеквадратичного отклонения:

$$L(y_{true}, y_{pred}) = \frac{1}{N} \sum_i (y_{true\_i} - y_{pred\_i})^2 \quad (8.12.)$$

В качестве алгоритма обучения был выбран наиболее распространенный в настоящее время алгоритм Adam [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Для проверки нейросетевой модели были сгенерированы данные для следующих зависимостей теплового потока от времени:

$$\begin{aligned} q_w &= \left\{ 50000 \cdot (1 - e^{-t}), 50000 \cdot (1 - e^{-5t}), 500t, 1000 + 20t \right\} \text{ Вт} \\ q_w &= \left\{ 500 \cdot \exp\left(-\frac{(t-100)^2}{500}\right), 1000 \cdot \exp\left(-\frac{(t-100)^2}{500}\right) \right\} \text{ Вт} \end{aligned} \quad (8.13.)$$

Результаты проверки показаны на Рис. 8.5

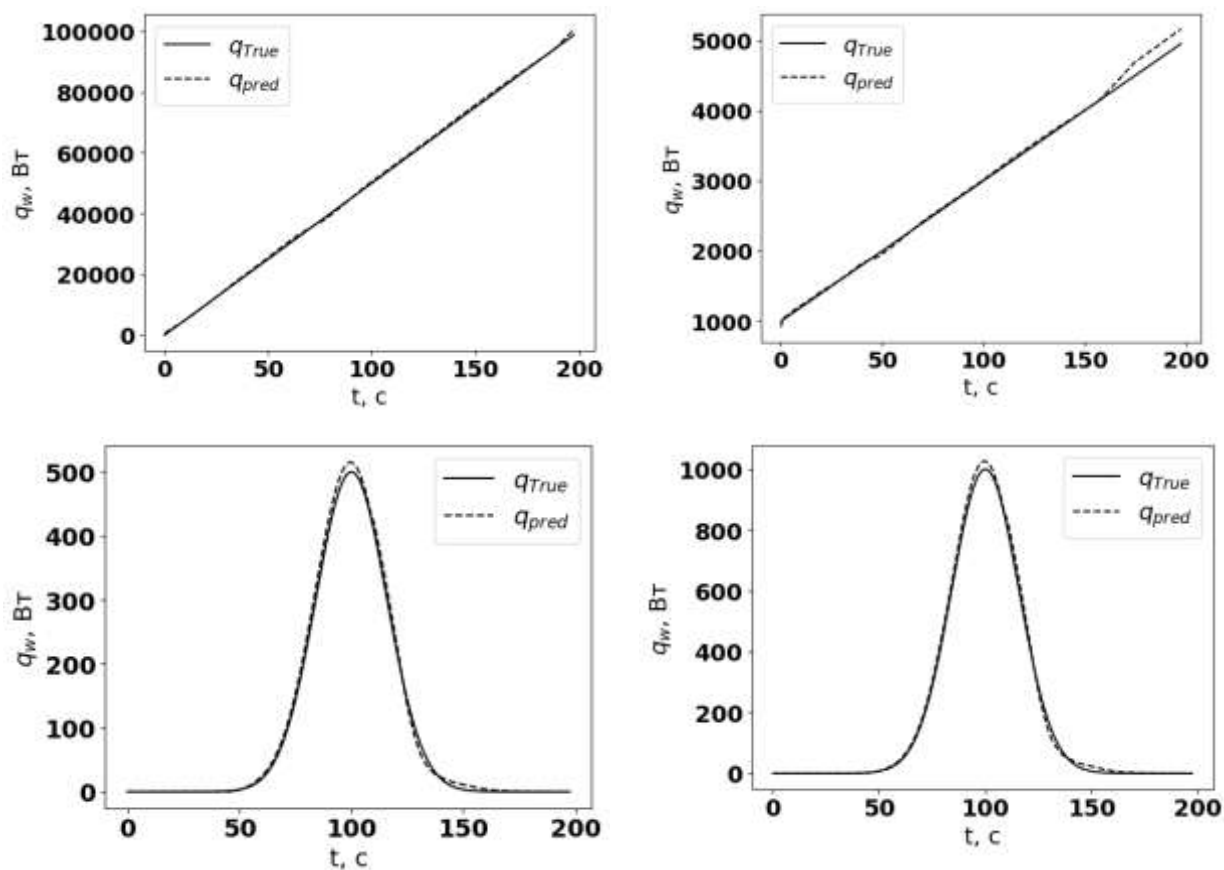
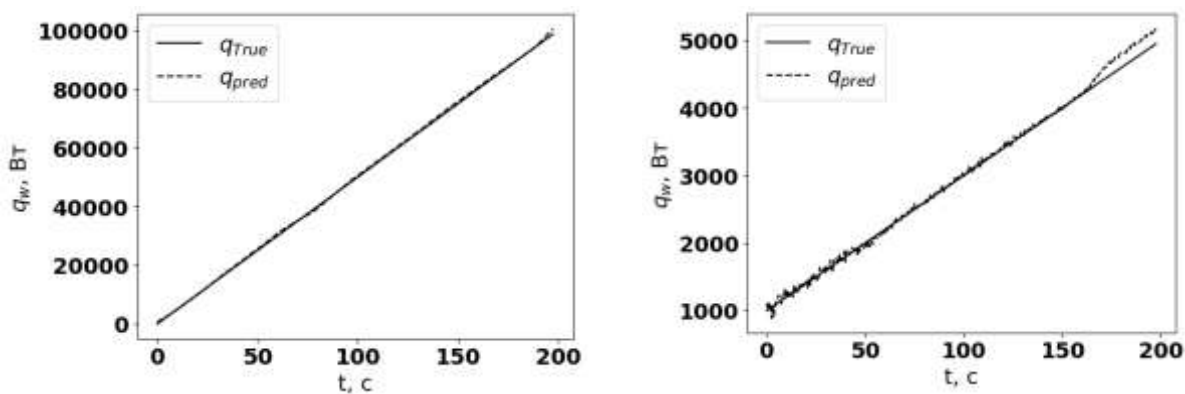


Рис. 8.5. Проверка работоспособности нейросетевой модели

Среднеквадратичная ошибка составила около 2,5%.

Дополнительно была проведена проверка модели на устойчивость к шуму в исходных данных. Шум вносился в виде нормально распределенной случайной величины с дисперсией 0,1К.

Результаты проверки с шумом показаны на Рис. 8.6.



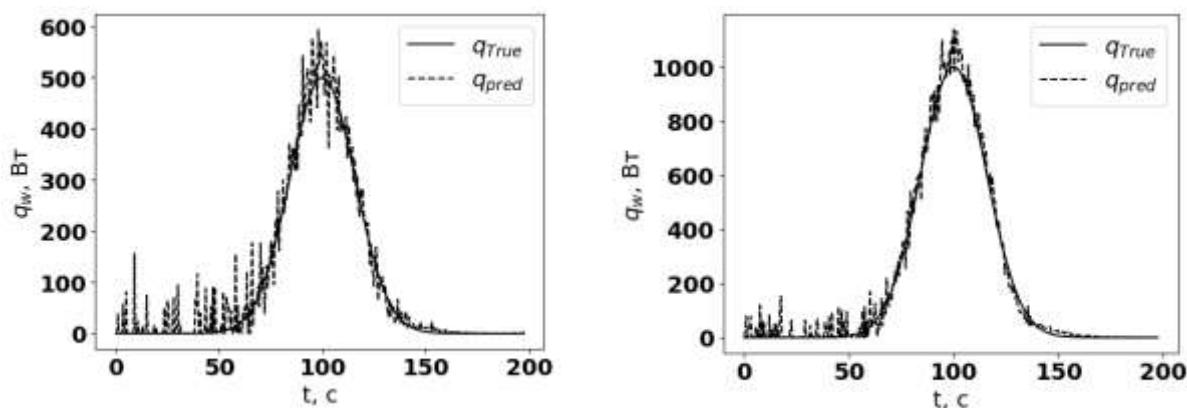


Рис. 8.6 Проверка работоспособности нейросетевой модели при внесении шума во входные данные

Как видно из рисунка, шум (погрешность в определении температуры) оказывает существенное влияние только при сравнительно малых значениях теплового потока.

Таким образом, возможность применения нейросетевых моделей для решения задач теплообмена на примере обратной задачи теплопроводности теоретически обоснована. При этом с инженерной точки зрения их применение имеет следующие преимущества:

1. Простота реализации. Для построения нейросетевой модели можно использовать общедоступные решения на базе библиотек с открытым исходным кодом, в которых весь необходимый функционал работы с искусственными нейронными сетями уже реализован. Таким образом, не требуется программная реализация и применение математически сложных методик, основанных на «классических» подходах [442-445].
2. Простота использования исходных данных любого типа — как полученных численно, так и экспериментальных, либо их комбинации.
3. Устойчивость к погрешностям в исходных данных без необходимости применения каких-либо специальных методов фильтрации.

### **8.3. Решение задачи контактного теплообмена с помощью нейронных сетей**

Активное развитие методов искусственного интеллекта стимулировало рост интереса к их применению для анализа и прогнозирования контактного термического сопротивления. Ряд исследований продемонстрировали высокий потенциал глубокого обучения в решении этой сложной задачи. Так, Чжан и соавт. [453] на основе базы из 876 опубликованных экспериментальных данных показали, что модели машинного обучения обеспечивают точное и эффективное прогнозирование КТС. Ву и др. [454], используя инфракрасную термографию для измерения КТС в паре стекло-сталь, обучили несколько моделей, превзошедших по точности традиционные теоретические уравнения. Рен и др. [455] разработали трёхслойную нейронную сеть прямого распространения (BP-ANN) для оценки контактной теплопроводности, способную одновременно прогнозировать теплопроводность материалов, тепловой поток и КТС по данным о температуре и давлении. Ли с соавторами [456] сосредоточились на применении метода к термоэлектрическим генераторам (TEG), предложив модель полносвязной нейронной сети (FF-ANN) для прогнозирования общего КТС системы. Эти работы подтверждают растущую роль машинного обучения в теплофизике.

В рамках данного исследования для решения задачи контактного теплообмена также разрабатывается прогностическая модель на основе радиально-базисной нейронной сети (RBF). Её обучение проводится на обширной синтетической базе данных, содержащей 10 000 примеров, сформированных путём вариации ключевых параметров: давления, температуры, теплофизических свойств материалов и шероховатости поверхности (фрагмент базы показан на рис. 8.8).

Цель и методология работы направлены на создание высокоточной нейросетевой модели, сочетающей вычислительную эффективность с точностью, характерной для традиционных методов. Работа выполняется в несколько этапов:

| №, п.п. | Приложенное давление, Па | Результаты численного моделирования   |                                      |              |                                           |                                          |                                            |                                              | Контактное термическое сопротивление |
|---------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|
|         |                          | Модуль упругости Верхнего образца, Па | Модуль упругости Нижнего образца, Па | Сближение, м | Теплопроводность верхнего образца (MAT 2) | Теплопроводность нижнего образца (MAT 1) | Температура нижней границы нижнего образца | Температура верхней границы верхнего образца |                                      |
| 1       | 139600                   | 1.98E+11                              | 1.98E+11                             | 9.268E-07    | 22                                        | 22                                       | 148.17                                     | 226.85                                       | 0.00786767                           |
| 2       | 139600                   | 1.852E+11                             | 1.98E+11                             | 9.569E-07    | 22                                        | 22                                       | 150.31                                     | 226.85                                       | 0.00765373                           |
| 3       | 139600                   | 1.98E+11                              | 1.66E+11                             | 9.632E-07    | 22                                        | 22                                       | 150.56                                     | 226.85                                       | 0.00762916                           |
| 4       | 139600                   | 1.66E+11                              | 1.98E+11                             | 9.936E-07    | 22                                        | 22                                       | 152.29                                     | 226.85                                       | 0.00745589                           |
| 5       | 139600                   | 1.98E+11                              | 1.34E+11                             | 1.002E-06    | 22                                        | 22                                       | 153.45                                     | 226.85                                       | 0.00733967                           |
| 6       | 139600                   | 1.66E+11                              | 1.66E+11                             | 1.004E-06    | 22                                        | 22                                       | 153.23                                     | 226.85                                       | 0.00736191                           |
| 7       | 139600                   | 1.66E+11                              | 1.34E+11                             | 1.044E-06    | 22                                        | 22                                       | 155.08                                     | 226.85                                       | 0.00717666                           |
| 8       | 139600                   | 1.98E+11                              | 1.02E+11                             | 1.064E-06    | 22                                        | 22                                       | 156.41                                     | 226.85                                       | 0.00704366                           |
| 9       | 139600                   | 1.34E+11                              | 1.98E+11                             | 1.076E-06    | 22                                        | 22                                       | 157.06                                     | 226.85                                       | 0.00697892                           |
| 10      | 139600                   | 1.34E+11                              | 1.66E+11                             | 1.087E-06    | 22                                        | 22                                       | 157.61                                     | 226.85                                       | 0.00692368                           |
| 11      | 139600                   | 1.34E+11                              | 1.34E+11                             | 1.103E-06    | 22                                        | 22                                       | 157.91                                     | 226.85                                       | 0.00689377                           |
| 12      | 139600                   | 1.66E+11                              | 1.02E+11                             | 1.106E-06    | 22                                        | 22                                       | 158.43                                     | 226.85                                       | 0.00684195                           |
| 13      | 139600                   | 1.34E+11                              | 1.02E+11                             | 1.161E-06    | 22                                        | 22                                       | 160.69                                     | 226.85                                       | 0.00661573                           |
| 14      | 139600                   | 1.98E+11                              | 7E+10                                | 1.174E-06    | 22                                        | 22                                       | 161.43                                     | 226.85                                       | 0.00654177                           |
| 15      | 139600                   | 1.02E+11                              | 1.98E+11                             | 1.188E-06    | 22                                        | 22                                       | 161.51                                     | 226.85                                       | 0.00653357                           |
| 16      | 139600                   | 1.02E+11                              | 1.66E+11                             | 1.197E-06    | 22                                        | 22                                       | 162.12                                     | 226.85                                       | 0.00647320                           |
| 17      | 139600                   | 1.66E+11                              | 7E+10                                | 1.209E-06    | 22                                        | 22                                       | 162.40                                     | 226.85                                       | 0.00644460                           |
| 18      | 139600                   | 1.02E+11                              | 1.34E+11                             | 1.211E-06    | 22                                        | 22                                       | 162.49                                     | 226.85                                       | 0.00643553                           |
| 19      | 139600                   | 1.02E+11                              | 1.02E+11                             | 1.233E-06    | 22                                        | 22                                       | 163.33                                     | 226.85                                       | 0.00635242                           |
| 20      | 279300                   | 1.98E+11                              | 1.98E+11                             | 1.248E-06    | 22                                        | 22                                       | 164.24                                     | 226.85                                       | 0.00626080                           |
| 21      | 139600                   | 1.34E+11                              | 7E+10                                | 1.255E-06    | 22                                        | 22                                       | 164.51                                     | 226.85                                       | 0.00623416                           |
| 22      | 279300                   | 1.98E+11                              | 1.66E+11                             | 1.288E-06    | 22                                        | 22                                       | 165.24                                     | 226.85                                       | 0.00616053                           |
| 23      | 279300                   | 1.66E+11                              | 1.98E+11                             | 1.319E-06    | 22                                        | 22                                       | 166.37                                     | 226.85                                       | 0.00604828                           |
| 24      | 139600                   | 1.02E+11                              | 7E+10                                | 1.321E-06    | 22                                        | 22                                       | 166.21                                     | 226.85                                       | 0.00606416                           |

Рис.8.8. База синтетических данных для обучения нейронной сети

На первом этапе производилась генерация обучающих данных: Высокоточные данные получают путём параметрического численного моделирования ТКС в различных условиях с использованием программного комплекса ANSYS (метод конечных элементов, МКЭ). В результате создаётся многопараметрическая база синтетических данных.

Далее выполнялось построение и обучение модели. На основе этой базы строится модель машинного обучения. В качестве входных признаков (X) используются параметры, влияющие на ТКС: давление на границе, шероховатость, теплофизические свойства материалов, температура. Целевой переменной (выход Y) является значение термического контактного сопротивления. Для прогнозирования применяется радиально-базисная нейронная сеть (RBF).

Следующим этапом проводилась верификация модели. Прогнозы, полученные с помощью обученной нейронной сети, сравниваются с результатами прямого конечно-элементного моделирования (МКЭ) для оценки точности.

Для обеспечения устойчивости и ускорения процесса обучения проводится нормализация входных данных. Поскольку исходные признаки имеют разный порядок величин, что может негативно влиять на сходимость алгоритма, все



векторы признаков приводятся к единому масштабу. В работе используется функция `mapminmax`, которая построчно нормирует данные в заданный диапазон (например,  $[0, 1]$  или  $[-1, 1]$ ), что является стандартной практикой при работе с нейронными сетями, в том числе в средах типа TensorFlow.

Функция обработки:

$$y = \frac{(y_{\max} - y_{\min})(x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} + y_{\min} \quad (8.14.)$$

В формуле (8.14)  $y$  - это нормализованный результат предварительной обработки данных,  $y_{\max}$  верхняя граница заданного интервала,  $y_{\min}$  нижняя граница заданного интервала,  $x$  препроцессированные данные,  $x_{\max}$  максимальное значение препроцессированных данных и  $x_{\min}$  минимальное значение препроцессированных данных.

Из данных по термическому сопротивлению, видно, что диапазон распределения термического сопротивления в основном находится в  $[20 \text{ mm}^2 \text{ K} / \text{W}, 650 \text{ mm}^2 \text{ K} / \text{W}]$ . Поэтому в качестве входного условия для контактного термического сопротивления задается 8000 наборов данных. После нормализации данных получаем матрицу  $X[P_i, R_a, \lambda, T]$ , состоящую из таких входных параметров, как давление на границу раздела, шероховатости поверхностей, теплопроводности образцов, температура границы раздела, а в качестве выхода  $Y$  используется контактное термическое сопротивление

При проектировании архитектуры радиально-базисной нейронной сети (RBF) важно учитывать её специфику. Скрытый слой в RBF выполняет функцию нелинейного отображения входных данных в пространство высокой размерности, и для этого, как правило, достаточно одного такого слоя. Однако ключевым параметром, напрямую влияющим на скорость сходимости и общую эффективность модели, является количество нейронов в скрытом слое. Его неоптимальный выбор приводит к следующим проблемам: избыточное число нейронов вызывает переобучение, резко увеличивает вычислительные затраты и

потребление памяти, в то время как недостаточное – не позволяет модели достичь требуемой точности прогнозирования.

Исходные параметры обучения включали скорость обучения 0.05 и количество эпох от 10 000 до 20 000. Применение описанных методов настройки в сочетании с предварительной нормализацией входных данных позволило достичь высокой прогностической точности модели. Ошибка прогноза не превысила 1%, а коэффициент корреляции между прогнозируемыми и целевыми значениями составил 0.98, что подтверждает адекватность выбранной архитектуры и алгоритмов обучения поставленной задаче. Программная реализация [77] на языке Python представлена на Рис.8.9.

```

#IMPORTING LIBRARIES
import tensorflow as tf
import pandas as pd
import numpy as np
from tensorflow.keras import layers

filename = "calci10.csv"
filepath = "C:\\Users\\Alexey\\"
file = filepath+filename

data=pd.read_csv(file, sep=',')
data = data.replace('.', ', ', regex=True)
data=data.apply(pd.to_numeric)
#print(data.head())

#делим датасет на тренировочный (train)
#и проверочный (test)
train=data.sample(frac=0.8, random_state=200)
test=data.drop(train.index)

#Разделяем аргументы и результат для train
features=train.copy()
res=features.pop('rk')
id=features.pop('id')

#Разделяем аргументы и результат для test
features_test=test.copy()
res_test=features_test.pop('rk')
id=features_test.pop('id')

#конвертируем в массив
features=np.array(features)
res=np.array(res)

features_test=np.array(features_test)
res_test=np.array(res_test)

#нормировка значений
normalize = layers.Normalization()
normalize.adapt(features)

rk_model = tf.keras.Sequential([
    normalize,
    layers.Dense(64),
    layers.Dense(1)
])

rk_model.compile(loss = tf.keras.losses.MeanSquaredError,
                 optimizer = tf.keras.optimizers.Adam())

rk_model.fit(features, res, epochs=5)

rk_result=rk_model(features_test).numpy()
print('Max error:', np.max(np.abs([rk_result.flatten()
print('RMSE error', np.sqrt(np.mean([rk_result.flatten()

#выгружаем результаты в файл
save_data=pd.DataFrame({
    'rk_calc':res_test.flatten(),
    'rk_ANN':rk_result.flatten()
})
save_data.to_csv('comparison.csv')

#сохраняем модель в файл
rk_model.save('saved_model/rk_model')

def rk_1(P, E, L1, L2, H1, H2, T):
    return (rk_model(np.array([P, E, L1, L2, H1, H2, T])))

def rk64(P, E, L1, L2, H1, H2, T):
    return np.float64(rk_model(np.array([P, E, L1, L2, H1

```

Рис.8.9. Программная реализация нейросетевой модели по расчету КТС [77] на языке Python

В следующей таблице 8.1. показан результат обучения нейронной сети между обучающей выборке 8000 и тестовой выборке 2000.

Таблица 8.1. Результат обучения нейронной сети

| Обучающая выборка | Значение КТС из выборки | Результат расчета КТС на основе нейросети |
|-------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| 1                 | 90.523                  | 90.425                                    |
| 2                 | 239.992                 | 240.032                                   |
| 3                 | 472.911                 | 472.874                                   |
| 4                 | 193.924                 | 193.939                                   |
| 5                 | 201.49                  | 201.404                                   |

|    |         |         |
|----|---------|---------|
| 6  | 258.823 | 258.874 |
| 7  | 571.318 | 571.460 |
| 8  | 295.640 | 295.592 |
| 9  | 73.994  | 73.8645 |
| 10 | 598.183 | 598.089 |
| 11 | 550.594 | 550.622 |
| 12 | 496.054 | 495.989 |
| 13 | 268.25  | 268.204 |
| 14 | 597.225 | 597.105 |
| 15 | 143.728 | 143.815 |

Полученные результаты подтвердили целесообразность использования нейросетевых подходов как альтернативы или дополнения к традиционным численным методам: такие модели обладают простотой реализации с применением открытых библиотек (TensorFlow, Python), устойчивы к зашумлённости экспериментальных данных и не требуют сложных регуляризационных процедур, характерных для классических методов решения обратных задач теплопроводности.

## Выводы по Главе 8

Рассмотрено применение искусственного интеллекта, в частности искусственных нейронных сетей, для решения задач контактного теплообмена и обратных задач теплопроводности. Показано, что использование нейросетевых моделей позволяет эффективно восстанавливать граничные тепловые потоки по дискретным измерениям температуры даже при наличии шума в данных. На примере одномерной нестационарной задачи теплопроводности продемонстрирована работоспособность модели на основе свёрточной нейронной сети с архитектурой, включающей слои Conv1D, Flatten и Dense, обученной на синтетических данных, полученных методом конечных элементов. Среднеквадратичная ошибка прогнозирования составила около 2,5 %, а устойчивость к погрешностям измерений подтверждена численно.

Для задачи контактного теплообмена разработана прогностическая модель на основе радиально-базисной нейронной сети (RBF), обученной на 10 000 синтетических примерах, сгенерированных в ANSYS с варьированием давления, шероховатости, температуры и теплофизических свойств материалов. Входными параметрами модели выступают физические характеристики контактной пары, выходом — значение контактного термического сопротивления. Применение нормализации входных данных и алгоритма обучения обеспечило высокую точность: ошибка не превысила 1 %, а коэффициент корреляции достиг 0,98.

Подтверждена целесообразность использования нейросетевых подходов как альтернативы или дополнения к традиционным численным методам: такие модели обладают простотой реализации с применением открытых библиотек (TensorFlow, Python), устойчивы к зашумлённости экспериментальных данных и не требуют сложных регуляризационных процедур, характерных для классических методов решения обратных задач теплообмена. Установлено, что предложенные нейросетевые решения находят практическое применение в реальном времени для диагностики и управления тепловыми процессами, особенно в условиях ограниченной доступности точных физических моделей или сложной геометрии контакта.

## ГЛАВА 9. Практическая реализация научных решений

### 9.1. Расчет тепловых процессов в конструкциях жидкостных ракетных двигателях малой тяги

#### 9.1.1. Постановка задачи исследования

Исследуемым объектом является конструкция жидкостного ракетного двигателя малой тяги с камерой сгорания, изготовленной на основе композиционных материалов (КМК-МС). На рисунке 9.1 представлена конструктивная схема двигателя малой тяги, который состоит из четырех частей: 1 – камера сгорания из КМК-МС, 2 – переходное кольцо из титанового сплава ТВ-36, 3 – прижимное кольцо из нержавеющей стали 12Х18Н9Т, 4 – переходная головка из нержавеющей стали 12Х18Н9Т.

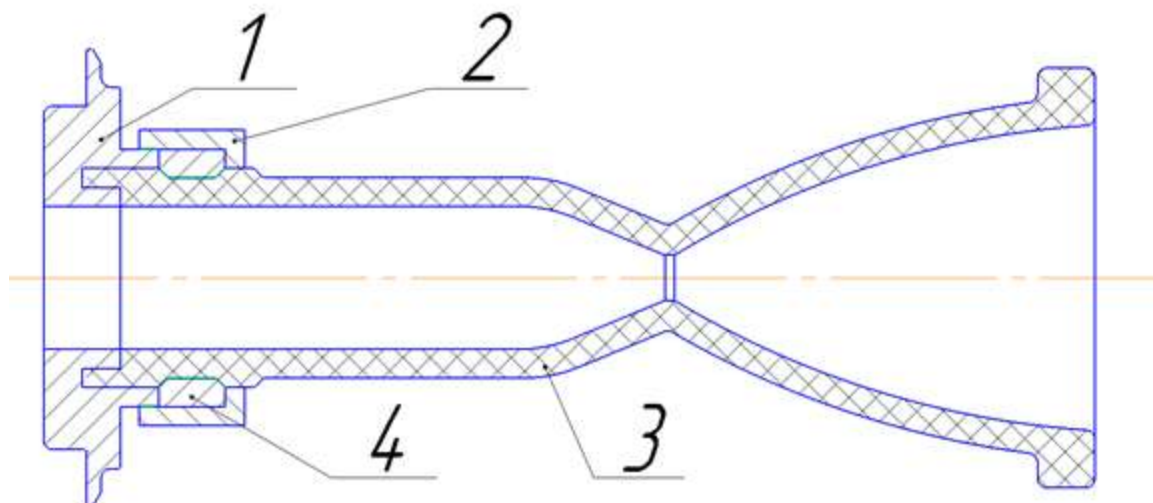


Рис. 9.1. Конструкция в сборе. (1 - переходная головка, 2 - прижимное кольцо, 3 – камера сгорания из композиционного материала, 4 - переходное кольцо).

Центрирование детали 3 происходит в переходной головке с помощью прижимного кольца. При этом для лучшей центровки используется переходное кольцо, представляющего собой два полукольца, закрепленные друг с другом с помощью сварки и проточенные затем соосно камере сгорания. Прижимное кольцо крепится к переходной головке с помощью сварки.

Анализ теплофизических свойств используемых материалов показывает, что материалы деталей конструкции имеют существенно различные значения

термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Высокие эксплуатационные температуры ЖРД МТ обуславливают значительные термические деформации деталей. При этом большая разница в величинах термического коэффициента линейного расширения используемых в конструкции материалов и приводит к появлению значительных зазоров между смежными деталями или к возникновению в местах их контактирования значительных напряжений, вызванных температурной деформацией.

### **9.1.2. Разработка расчетной модели**

С целью определения полей температуры и давления в жидкостном ракетном двигателе малой тяги была построена его твердотельная геометрическая модель.

В связи с тем, что основной процесс контактного теплообмена происходит в местах крепления камеры сгорания к переходной головке двигателя, а также, то, что геометрическая модель представляет собой осесимметричную конструкцию, для снижения требования к вычислительным ресурсам и времени выполнения теплового и механического анализа, в расчетах были приняты следующие допущения:

- в расчетную область помещается только часть камеры сгорания, расположенная вблизи мест крепления;
- рассматривается сектор с углом раскрытия  $30^\circ$ .

На рисунке 9.2 представлен сектор реальной конструкции КС, который в дальнейшем с учетом сделанных допущений и преобразований будет фигурировать как расчетная модель для которой в дальнейшем и выполнялся предварительный расчет теплового и механического состояния конструкции.

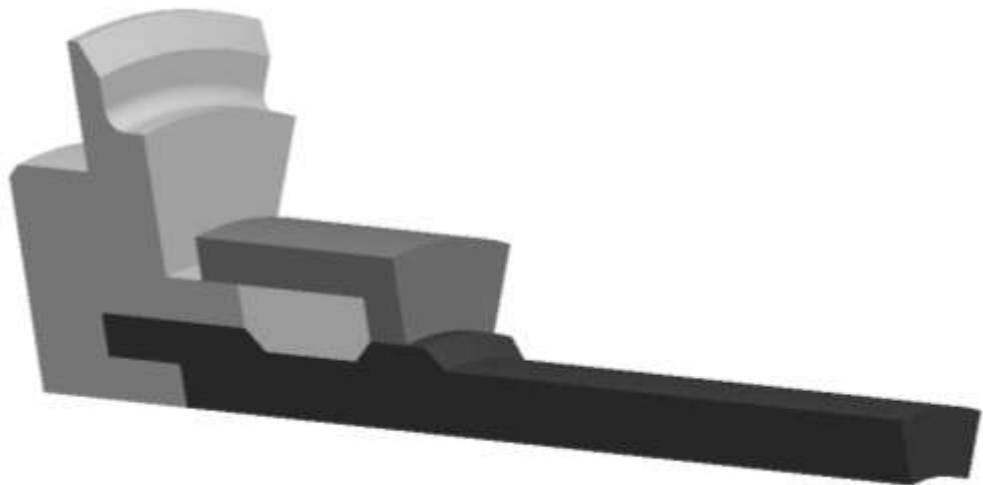


Рис. 9.2. Объемная геометрическая модель.

После создания трехмерной модели исследуемого объекта, было выполнено построение конечно-элементной сетки для последующего расчета. Сгенерированная на геометрической модели расчетная сетка являлась основой для составления и решения системы уравнений механики и теплопередачи в матричном виде.

Результат генерации конечно-элементной сетки представлен на рис. 9.3 и 9.4. Для наглядности на рис. отображено  $\frac{3}{4}$  детали.

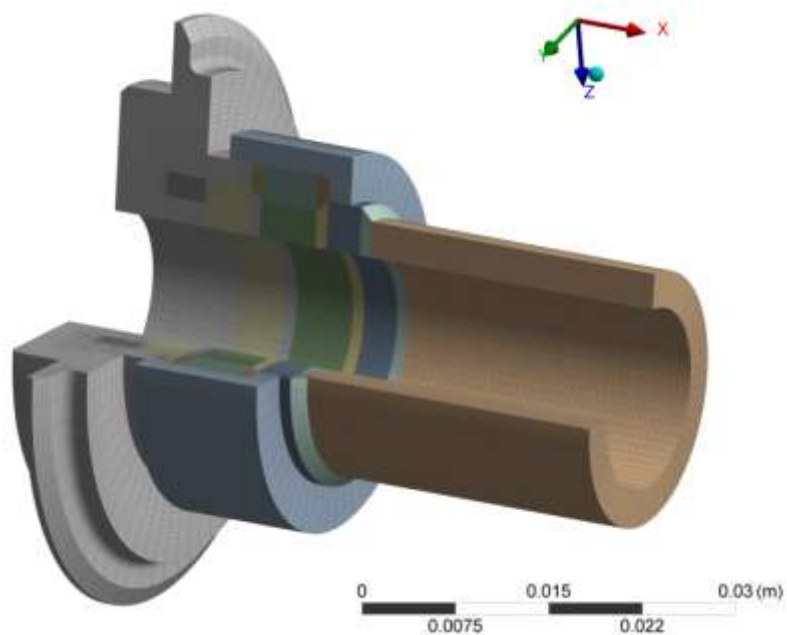


Рис.9.3. Конечно-элементная модель для расчета.

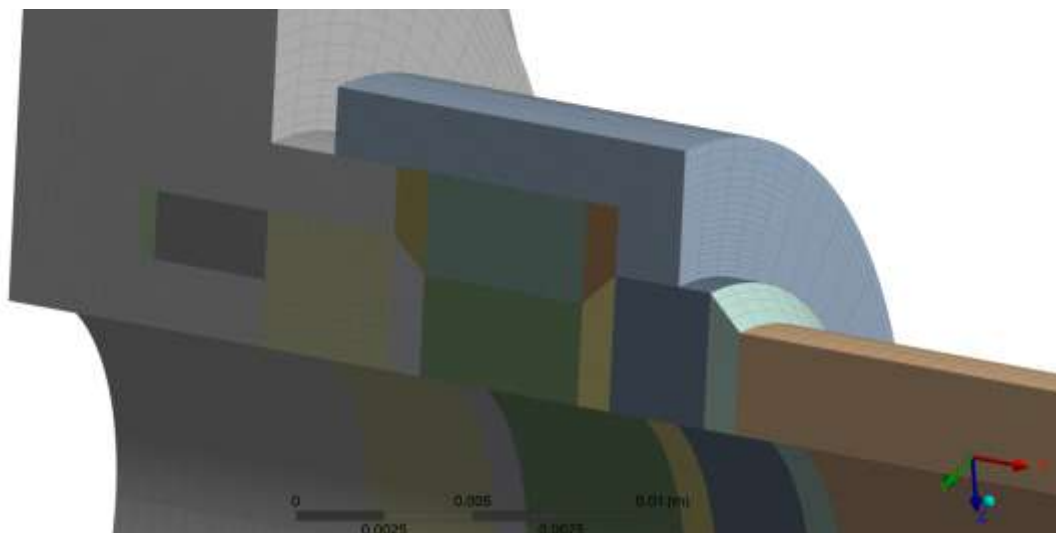


Рис.9.4. Стыковочный узел, укрупненно.

Как видно из рисунков, при создании сеточной модели особое внимание было уделено конформности сеточной модели в области контакта поверхностей деталей, т.е. задавалось условие совмещения узлов расчётной сетки одной детали с узлами сетки другой, поэтому помимо основных параметров создания сеточной модели задавались параметры в узлах контактов поверхностей.

### 9.1.3. Установка граничных условий и обоснование параметров

Точный и корректный расчёт различных вариантов контакта двух и более тел является чрезвычайно важной задачей при проектировании сборок с сопрягаемыми деталями, сварных соединений и т.п. Такие виды контактного анализа должны учитывать не только геометрию и допуски на размеры, но и физический процесс контактного взаимодействия.

Контактные задачи имеют две довольно значительные проблемы. Во-первых, область контакта в общем случае неизвестна до начала решения задачи. В зависимости от нагрузок, свойств материалов, граничных условий и других факторов, поверхности могут входить и выходить из контакта. Во-вторых, в большинстве контактных задач необходимо учитывать трение. Учет реакции на трение значительно усложняет сходимость задачи. Кроме того, контактные задачи



могут включать различные связанные эффекты, такие как теплопроводность, электрические токи и магнитный поток через области контакта.

Модели контактов между поверхностями ЖРД МТ были заданы из условий сборки данного изделия. Задание модели контакта отображено на рисунке 9.5.

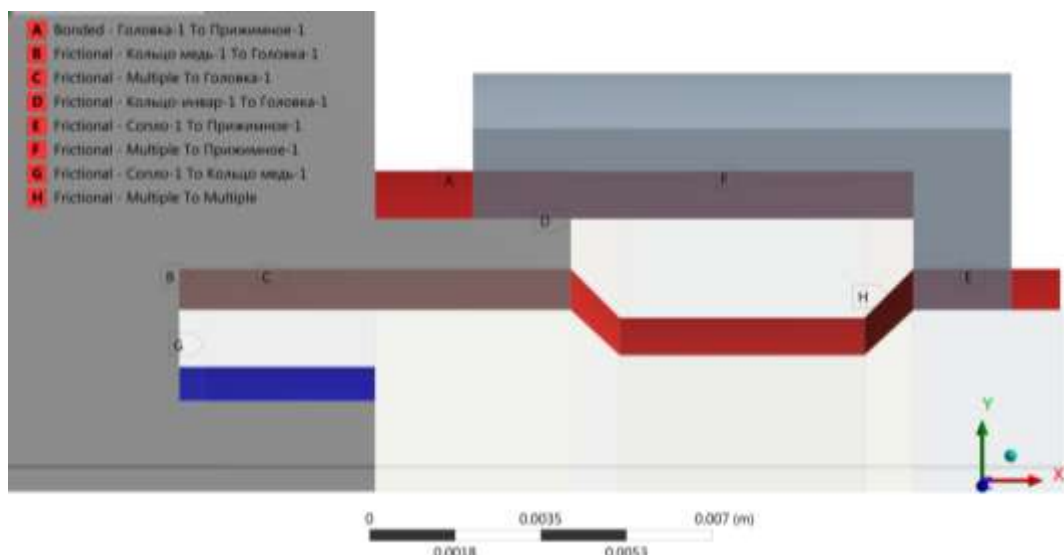


Рис. 9.5 Установка типов контакта.

В данном случае все контактирующие детали используют модель контакта с учетом трения (*Frictional*) и только один контакт – модель контакта сварку (*Bonded*). Выбор коэффициента трения между соприкасающимися материалами был взят из справочника. Данные по коэффициентам трения приведены в таблице 9.1.

Таблица 9.1. Коэффициенты трения между материалами.

| Пары материалов     | Коэффициент трения, $\mu$ |
|---------------------|---------------------------|
| 12X18H9T - 12X18H9T | 0,8                       |
| 12X18H9T - КМК-МС   | 0,15                      |
| 12X18H9T – ТВ-36    | 0,3                       |
| КМК-МС - ТВ-36      | 0,3                       |

Одним из важных этапов подготовки к проведению расчета и получения удовлетворительных результатов является определение внешних воздействий (механических, тепловых и т.д.) на конструкцию.

Обычно внешнее воздействие определяется на границе созданной модели. Под терминами «ограничение» и «нагрузка» понимаются все разнообразные процессы, которые происходят как на поверхностях твердого тела, так и в отдельных точках внутри него. Под «ограничением» понимается: закрепление, то есть ограничение перемещений и вращений в структурном анализе, либо определение температуры при решении задач теплообмена: а под «нагрузкой» - приложение сосредоточенных или распределенных сил (структурный анализ) или тепловых потоков (задачи теплообмена) и т.д.

В качестве граничных условий для теплового расчета были указаны *A* - тепловой поток в стенку камеры сгорания  $q = 1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, *B*, *C* – излучение в окружающую среду с поверхности изделия. Степень черноты материалов принималась равной 0,8. (Рис.9.6)

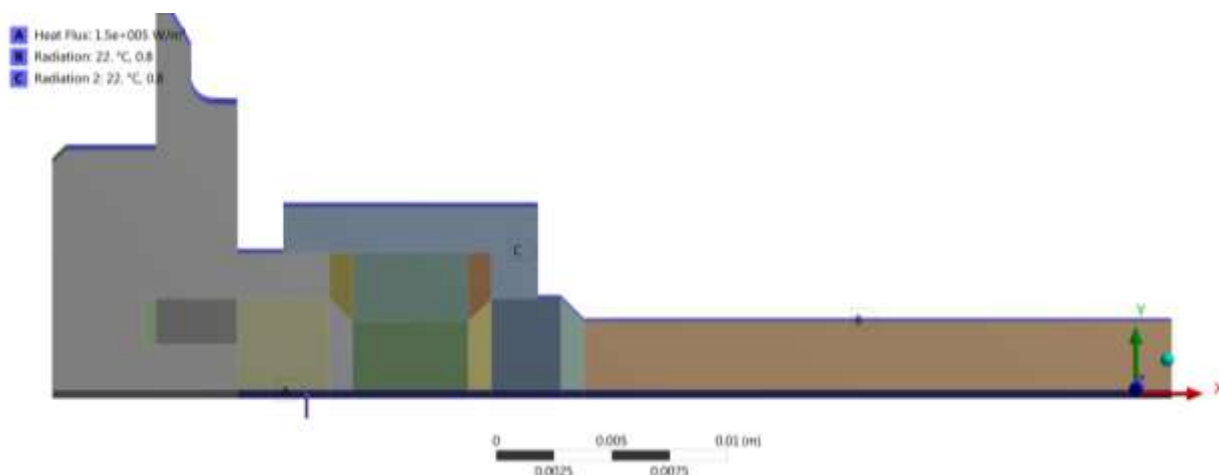


Рис.9.6 – Установка граничных условий.

#### 9.1.4. Решение термо-прочностной задачи

После задания граничных условий, был выполнен тепловой расчет. Результатом расчета является поле температур как всей конструкции в целом, так и отдельных её частей, а так же величина и направление теплового потока в элементах конструкции (Рис.9.7-9.10).

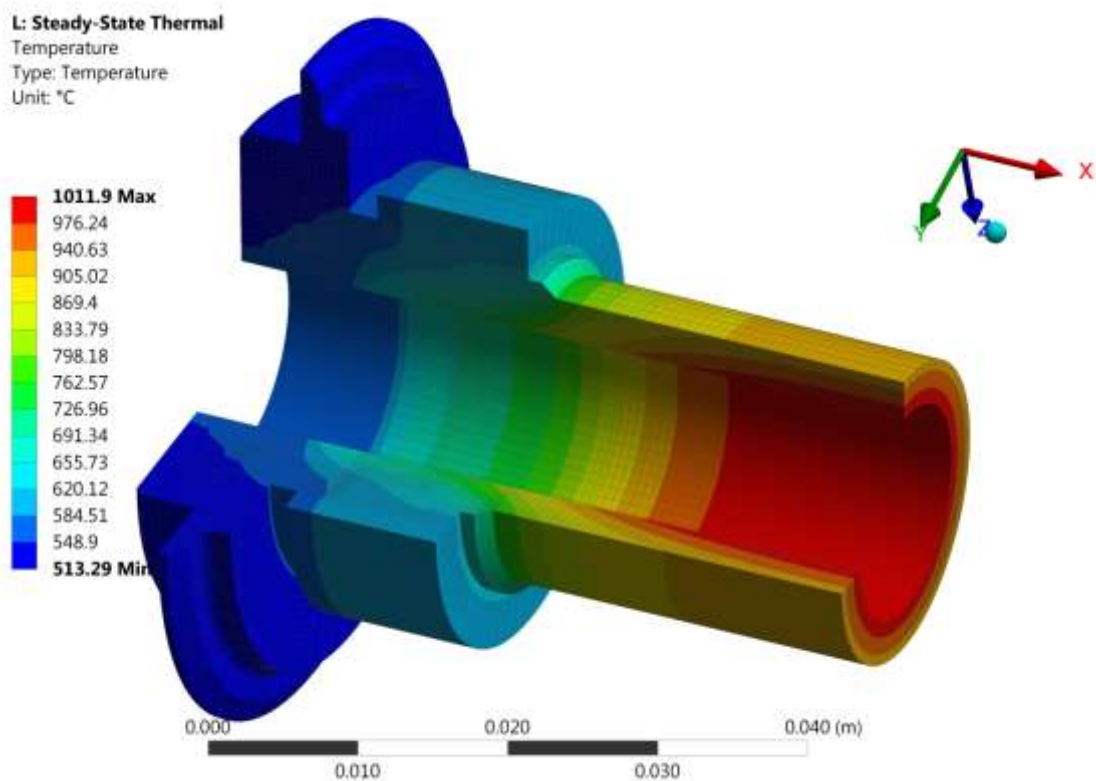


Рис.9.7. Температурное поле конструкции.

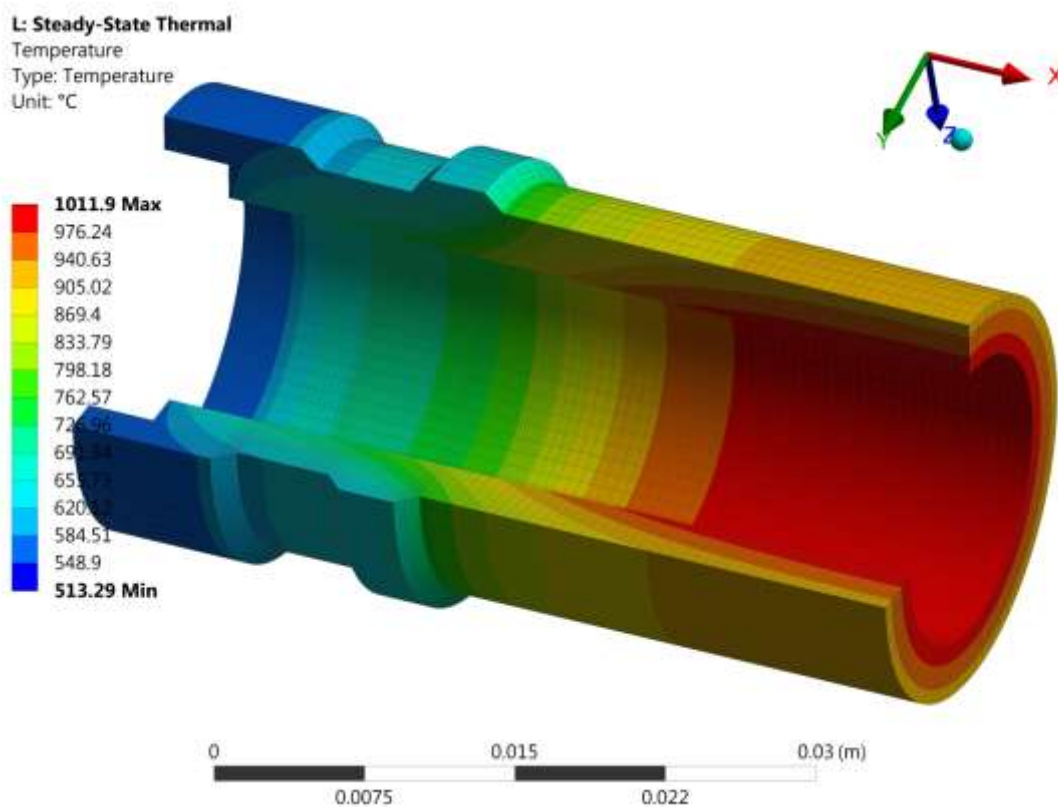


Рис.9.8. Температурное поле композитной камеры сгорания.

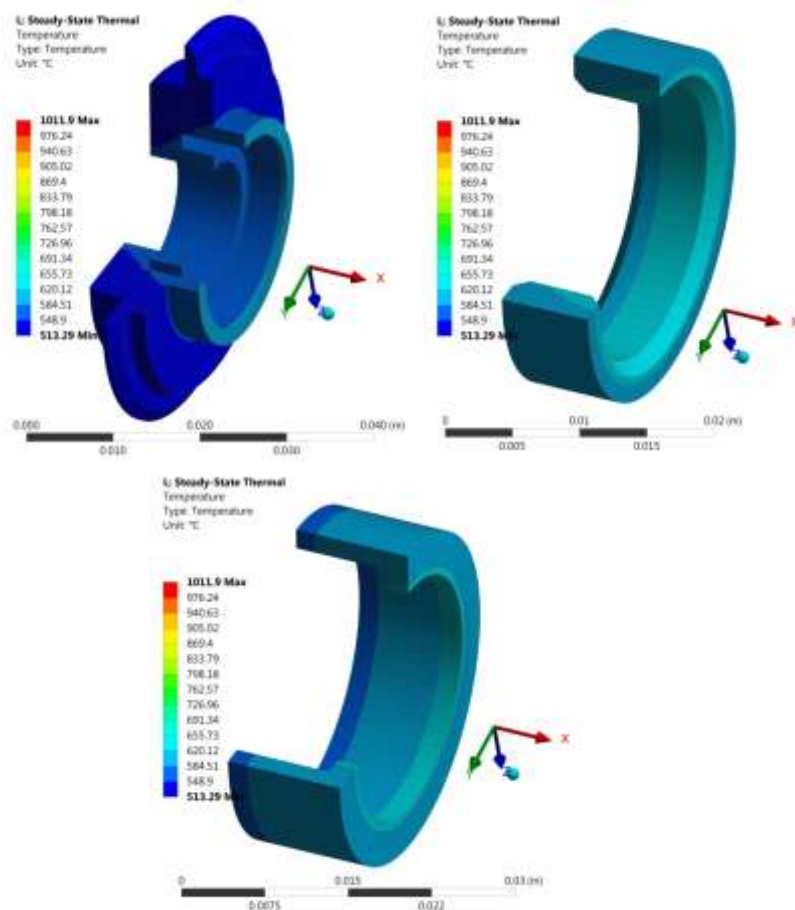


Рис.9.9. Температурные поля переходной головки, переходного и прижимного колец.

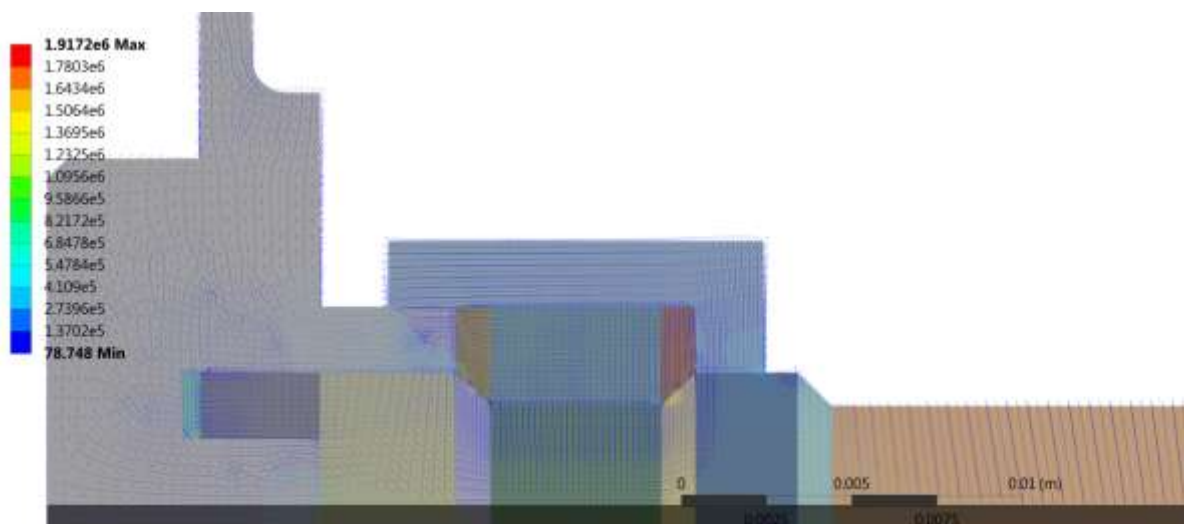


Рис.9.10. Направление и величина теплового потока в элементах конструкции.

Полученное поле температур в дальнейшем используется как одно из граничных условий для прочностного расчета. Вторым граничным условием являлось давление в камере.

Результатом проведенного прочностного анализа является поле эквивалентных напряжений, деформаций как всей конструкции в целом, так и ее составных узлов (Рис.9.11-9.14).

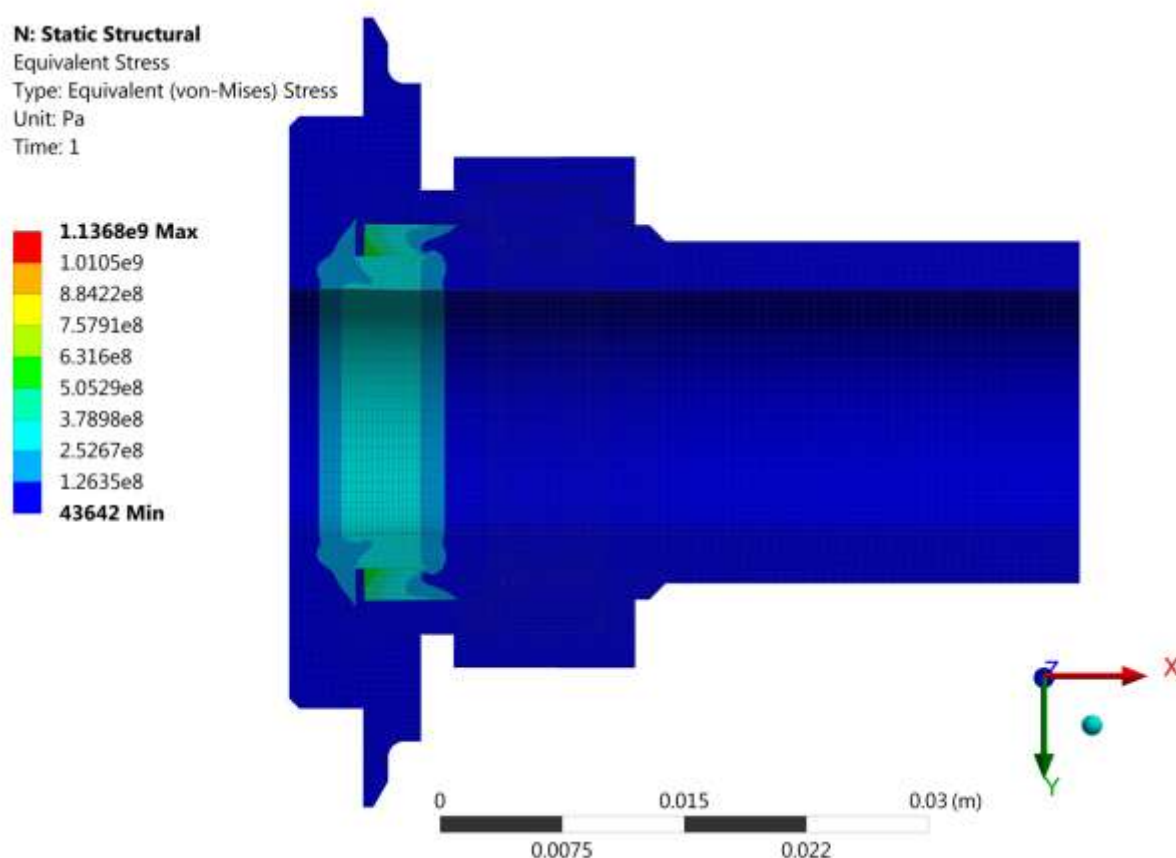


Рис.9.11. Эквивалентные напряжения в конструкции.

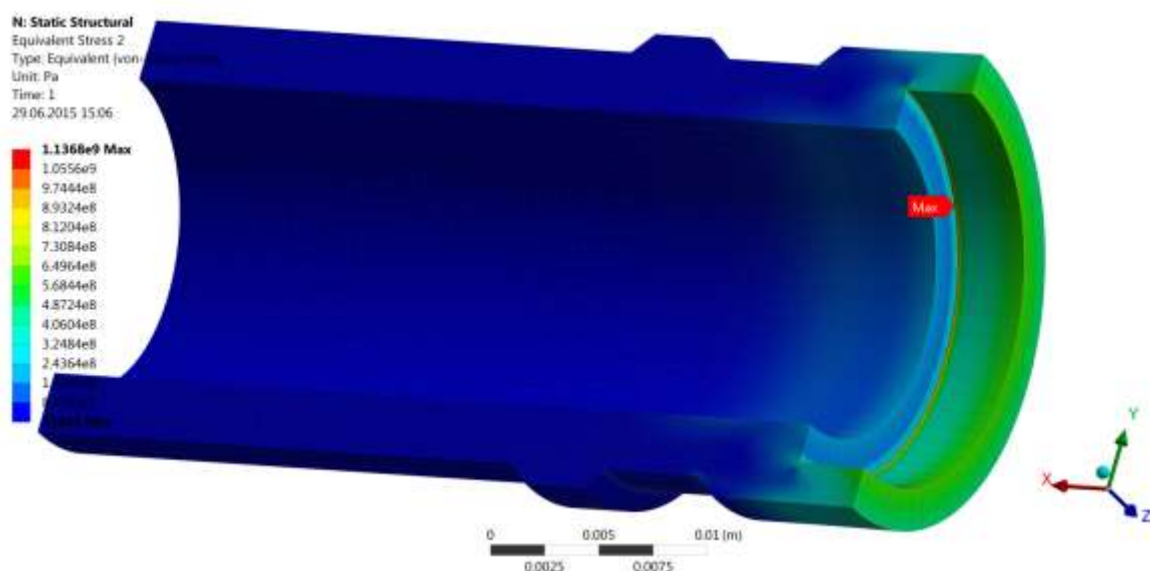
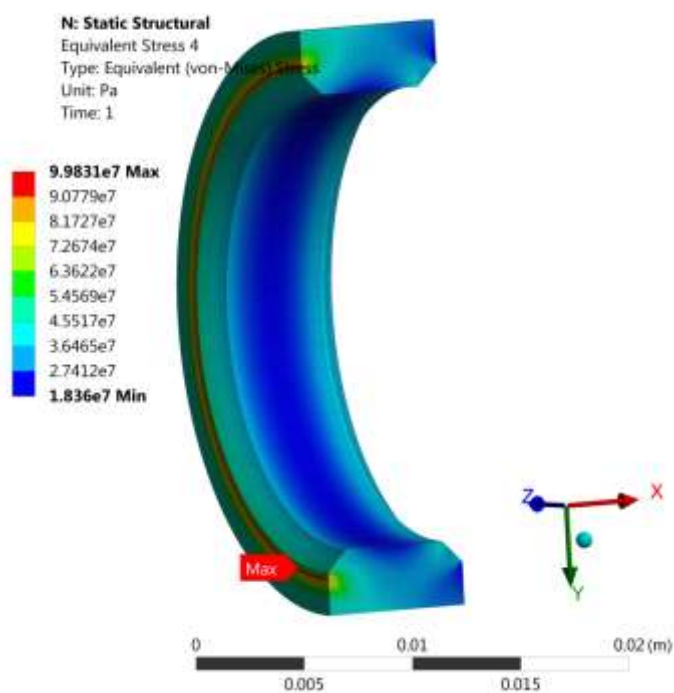


Рис. 9.12. Поле эквивалентных напряжений камеры сгорания





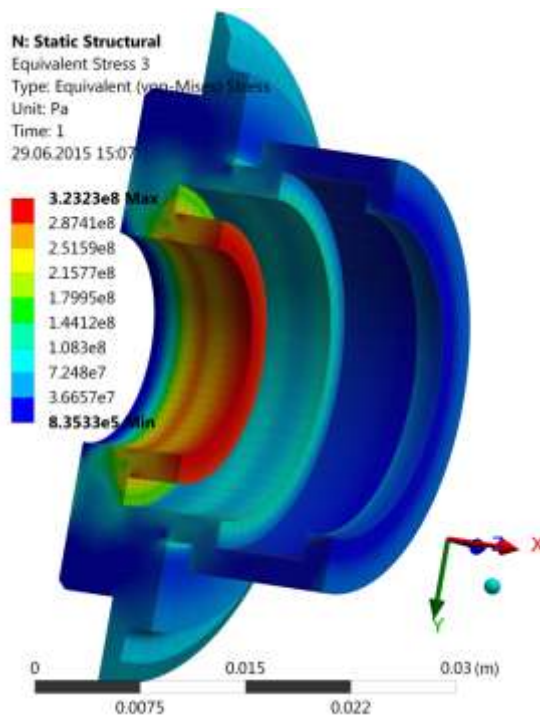


Рис. 9.13. Поле эквивалентных напряжений прижимного и переходного колец.

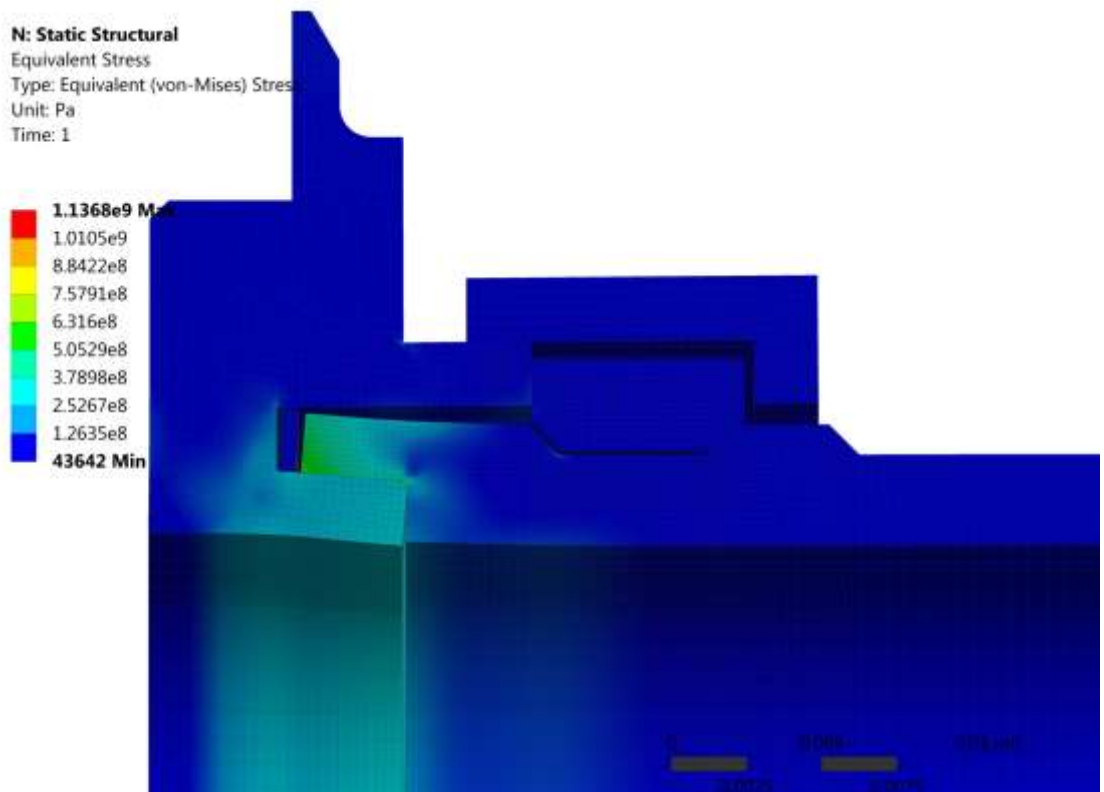


Рис.9.14. Поле эквивалентных напряжений конструкции (в масштабе перемещений 5:1).

Эквивалентные деформации и напряжения рассчитывались на основании четвертой теории прочности по формулам:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{1/2 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{1/2 [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - главные напряжения;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - главные деформации;

$\mu$  - коэффициент Пуассона.

Максимальное касательное напряжение или максимальная деформация, рассчитывалась по формулам:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Величины напряжения или деформации:

$$\sigma_I = \max\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|\} = 2\tau_{\text{max}}$$

$$\varepsilon_I = \max\{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|, |\varepsilon_2 - \varepsilon_3|, |\varepsilon_3 - \varepsilon_1|\} = \gamma_{\text{max}}$$

Температурные напряжения:

$$\varepsilon_t = \alpha(T - T_{\text{ref}})$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения;

$T$  - температура в узле;

$T_{\text{ref}}$  - исходная температура тела.

По результатам проведенного термо-прочностного анализа установлено, что в ступенчатом узле стыковки композитной камеры сгорания и переходной головки происходит неравномерное расширение деталей, обусловленное различными значениями ТКЛР материалов деталей. Переходная головка из нержавеющей стали значительно сильнее расширяется при нагреве, в результате



чего изгибает участок композитной камеры сгорания в месте стыка, увеличивая значения эквивалентного напряжения до значений, существенно превышающих предел прочности материала КМК-МС.

#### **9.1.5. Рекомендация по совершенствованию контактного узла.**

При первоначальном проектировании узла стыковки композитной камеры сгорания и переходной головки, для центрирования детали 3 (Рис.9.1) использовалось ее ступенчатое соединение с деталью 1, и обеспечить фиксацию камеры сгорания с помощью прижимного узла, состоящего из деталей 2 и 4. Детали 1, 2 выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н9Т с термическим коэффициентом линейного расширения равным  $18 \cdot 10^{-6}$  1/К, деталь 2 выполнена из титанового сплава с ТКЛР равным  $8 \cdot 10^{-6}$  1/К, а деталь 1 выполнена из углерод-углерод композиционного материала со значением ТКЛР равным  $0,5 \cdot 10^{-6}$  1/К.

В процессе работы двигателя образованное за счет сгорания топлива газообразное рабочее тело начинает нагревать стенку камеры сгорания 3, т.е. имеет место тепловой поток, направленный в стенку. Тепловой поток направлен от более горячих областей конструкции к менее горячим, т.е. от стенок камеры сгорания он направлен через узлы контакта к деталям 1,2,4. Очевидно, что при нагреве этих деталей будет происходить температурная деформация, которая, в следствии различных ТКЛР используемых в конструкции материалов, будет протекать по-разному. В связи с тем что ТКЛР нержавеющей стали выше ТКЛР титанового сплава, детали 1 и 2 будут расширяться сильнее и в итоге создавать дополнительные напряжения в местах контакта с деталями 3 и 4, имеющими меньшее значение ТКЛР. Дополнительные напряжения, возникшие в местах контакта и деталях конструкции приводят к деформации всей конструкции. Увеличение межконтактного давления приводит к увеличению площади пятен контакта, что оказывает заметное влияние на значение контактного термического сопротивления.

По результатам, полученным в ходе ранее проведенного расчёта, была предложена доработка геометрии конструкции, позволившая уменьшить до

приемлемых значений напряжения в узле стыковки композитной камеры сгорания и переходной головки. Графическая иллюстрация конструкции с доработанной обновленной геометрией представлена на рисунке 9.15.

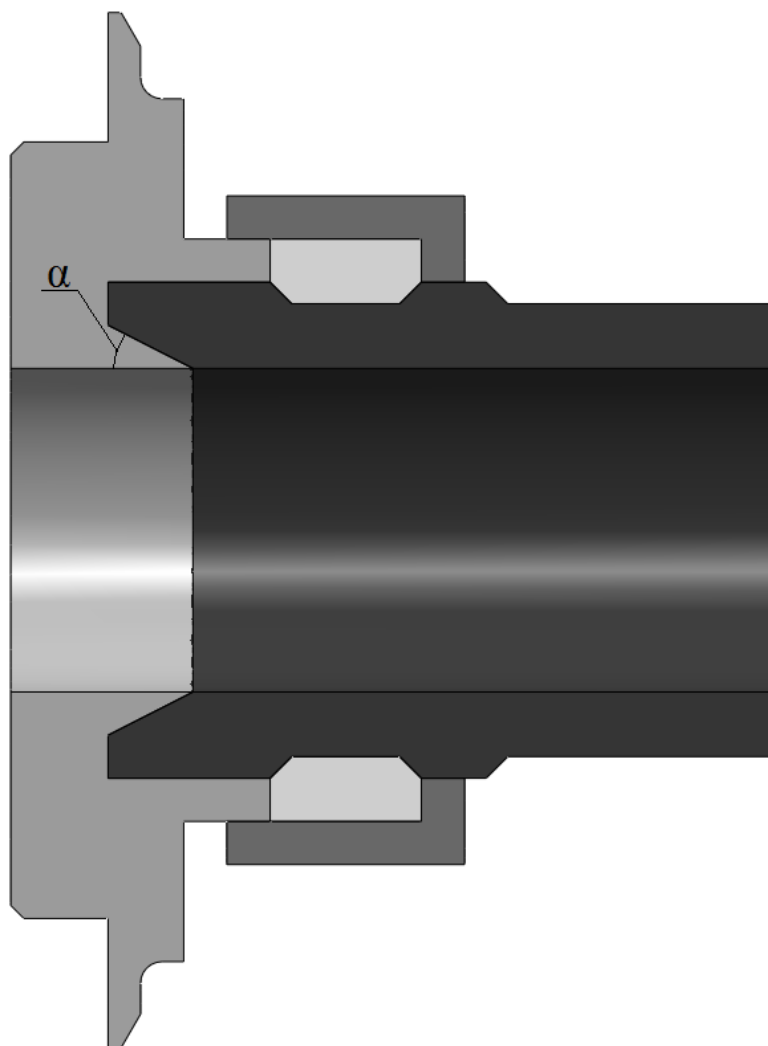


Рис.9.15. Обновленная геометрия.

Как видно из приведенного рисунка, жесткое контактирование поверхностей было заменено на их скольжение относительно друг друга по углу сопряжения  $\alpha$ . Такое решение позволило не только снизить значения напряжения в узле стыковки, но и решить задачу обеспечения герметичности конструкции. В рассматриваемом случае герметичность конструкции выполняется при условии, что соблюдается необходимое давление в узлах контакта, а так же замкнутость всего контура в целом. Таким образом, задача сводится к обеспечению необходимого давления в местах контакта, указанных на Рис.9.16.

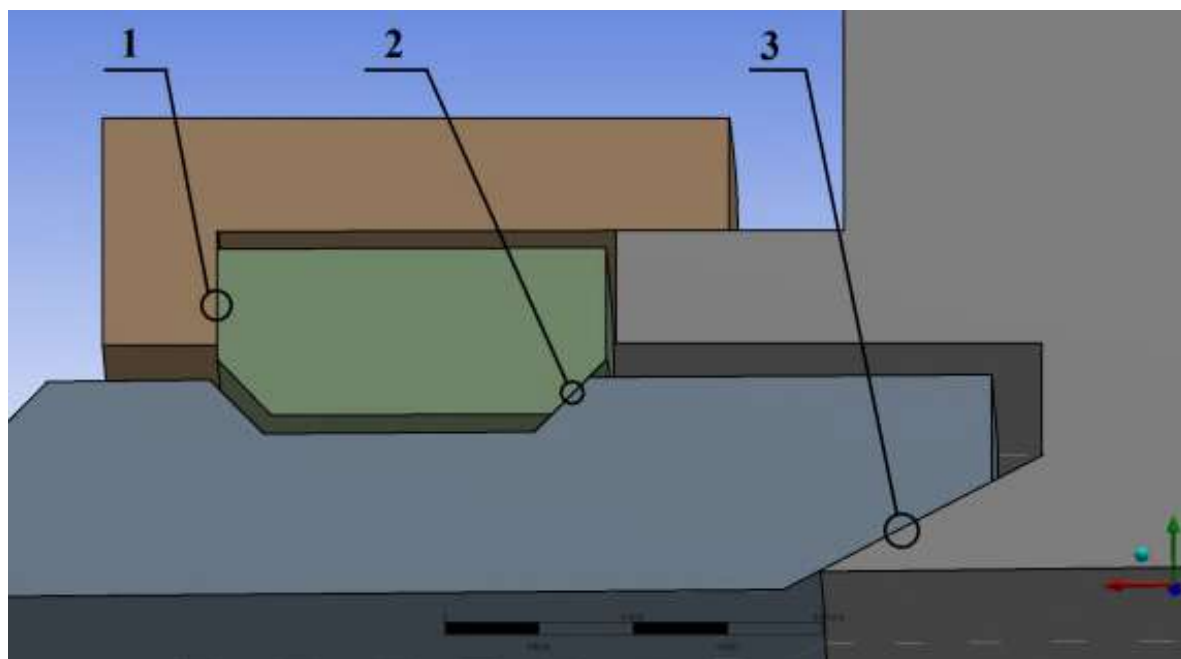


Рис.9.16. Места фактического контакта (1 – прижимного кольца и переходного кольца, 2 – переходного кольца и камеры сгорания, 3 – переходной головки и камеры сгорания).

#### 9.1.6. Расчет усовершенствованной геометрии

На основе предложенного решения была построена трехмерная модель для последующего анализа (Рис.9.15). Узел стыковки в данной геометрии построен таким образом, чтобы в дальнейшем была возможность изменения величины угла сопряжения.

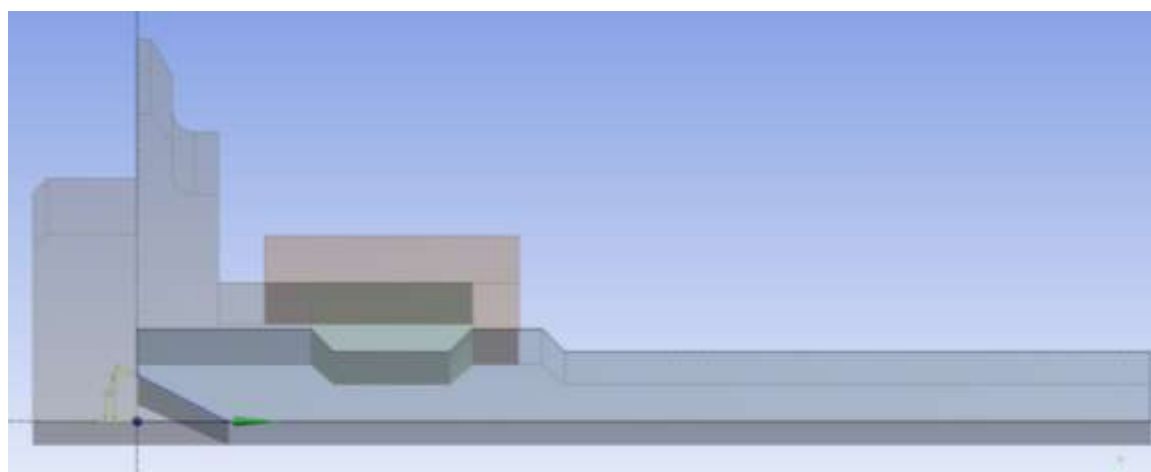


Рис.9.15. Обновленная расчетной геометрии.

Обозначение данного угла в качестве параметра позволяет варьировать диапазоном изменения угла на базе одной трехмерной модели, что значительно ускоряет моделирование и вычисление возможных вариантов конструкции.

Как и в предыдущем расчете были сделаны следующие допущения:

- рассматривается только часть камеры сгорания в местах контактов,
- рассматривается сектор с углом поворота  $30^\circ$ , а не вся конструкция.

Результат построения конечно-элементной сетки представлен на рисунке 9.16.

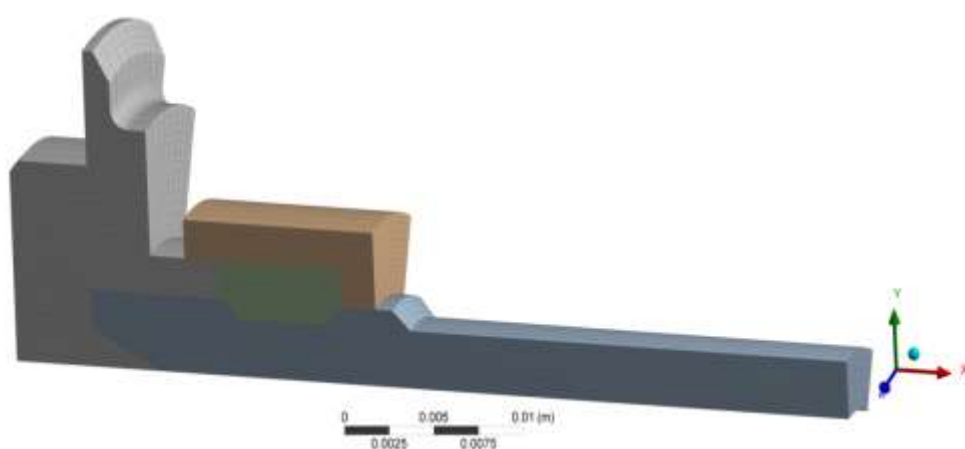


Рис.9.16 Конечно-элементная модель для расчета.

Модели контактов между поверхностями задавались из условий, определяемых технологией сборки двигателя. Модель контактов приведена на рисунке 9.17.

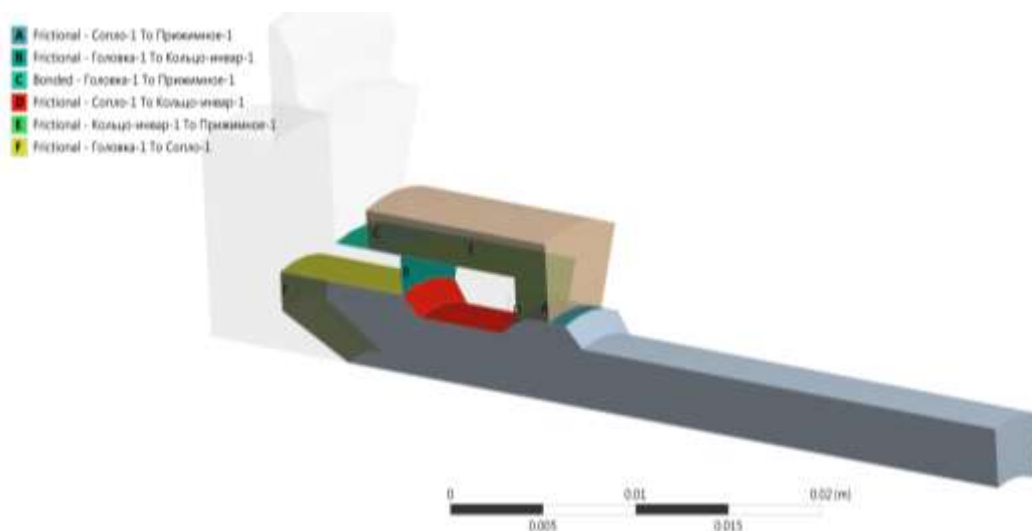


Рис. 9.17. Модель контактов.

Значения коэффициента трения между соприкасающимися материалами взяты из таблицы 9.1.

В качестве граничных условий для теплового расчета указаны  $A$  - тепловой поток в стенку камеры сгорания  $q = 1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>,  $B$ ,  $C$  – излучение в окружающую среду с поверхности изделия. Степень черноты материалов принималась равной 0,8. (Рис.9.18)

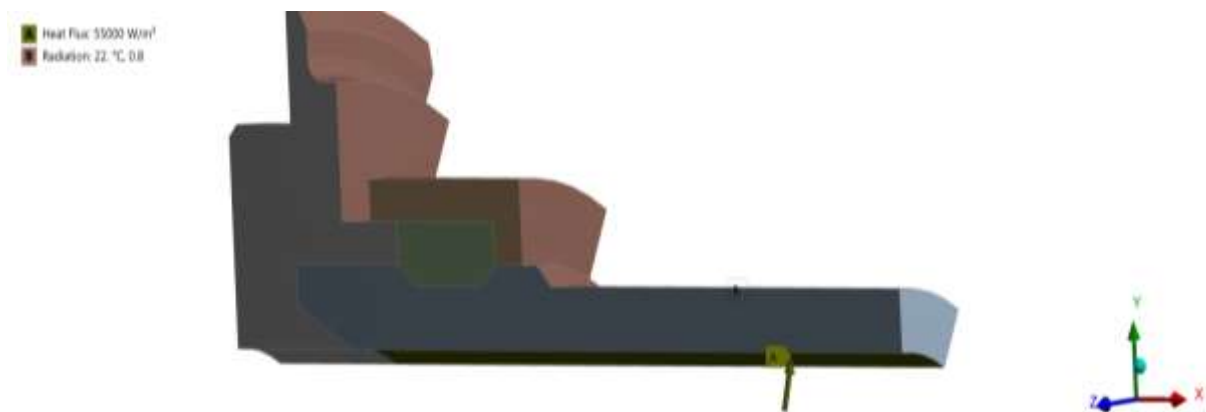


Рис.9.18. Установка граничных условий.

Результатом проведения теплового расчета является поле температур как всей конструкции в целом, так и отдельных её частей, а так же величина и направление теплового потока (Рис.9.19-9.22).

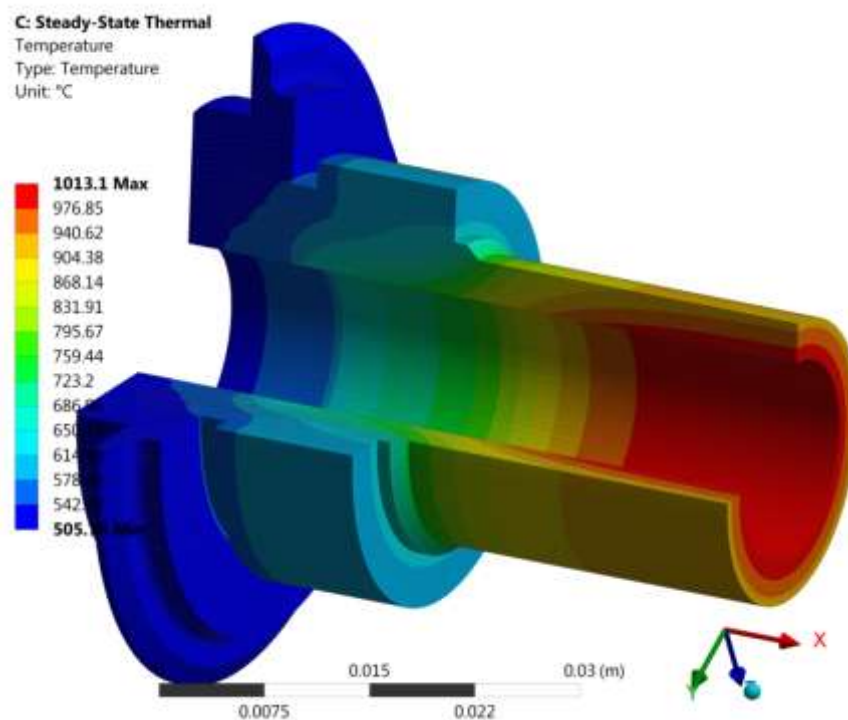


Рис.9.19. Температурное поле конструкции.

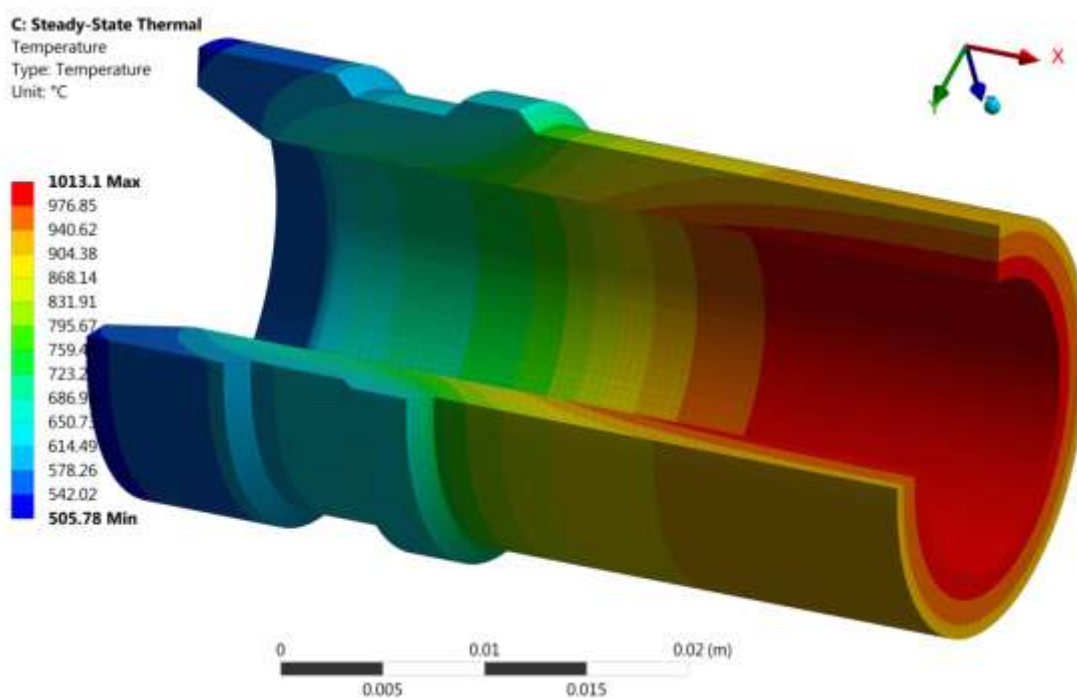


Рис.9.20. Температурное поле в композитной камере сгорания.

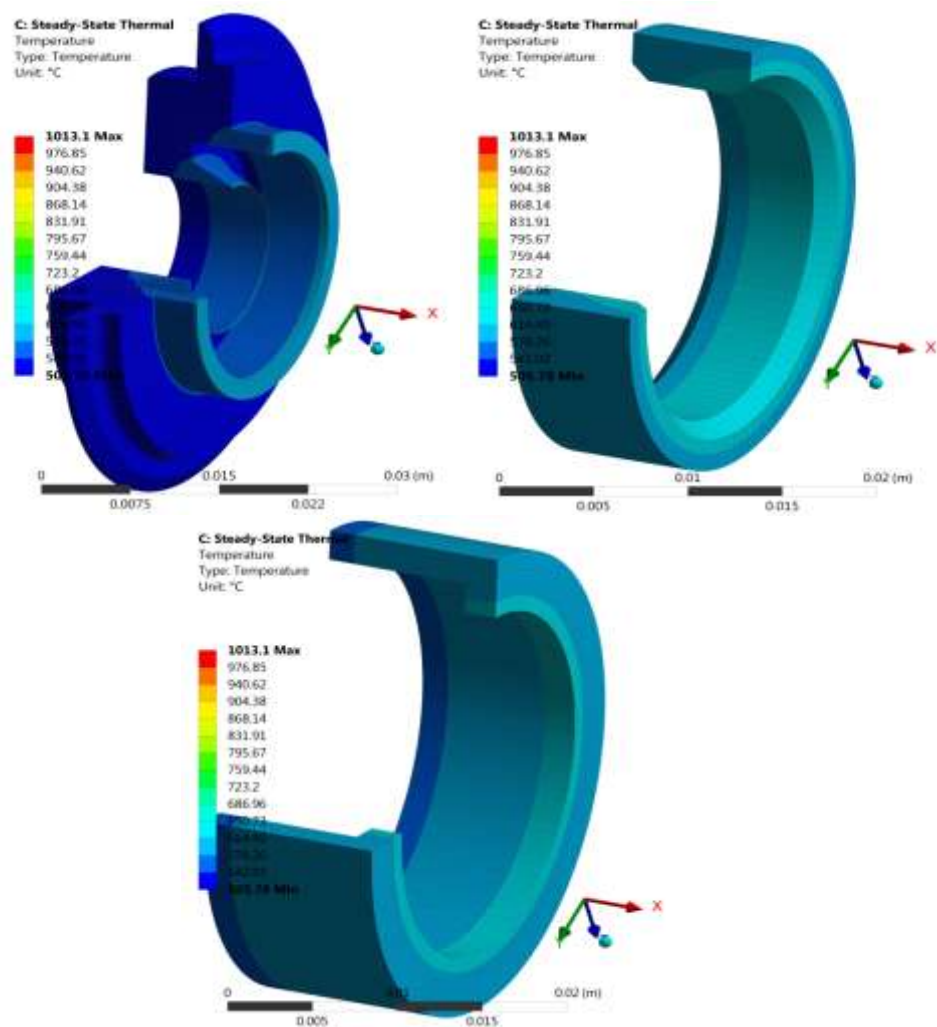


Рис.9.21. Температурное поле переходной головки, переходного и прижимного колец.

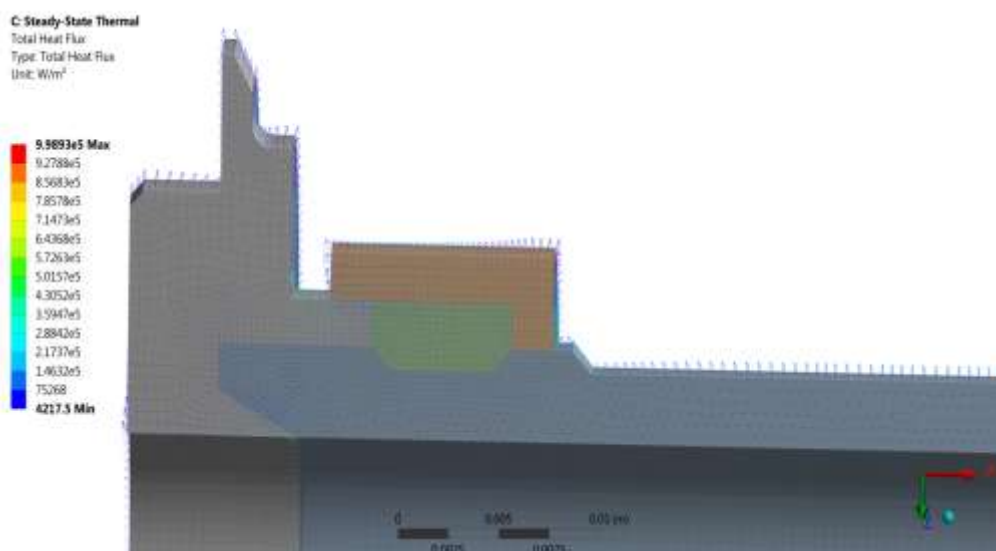


Рис.9.22. Направление и величина тепловых потоков в конструкции.

В качестве граничных условий для прочностного расчета задавалось температурное поле конструкции. Результатом проведенного прочностного анализа является поле эквивалентных напряжений, деформаций как всей конструкции в целом, так и ее составных узлов (Рис.9.23-9.39).

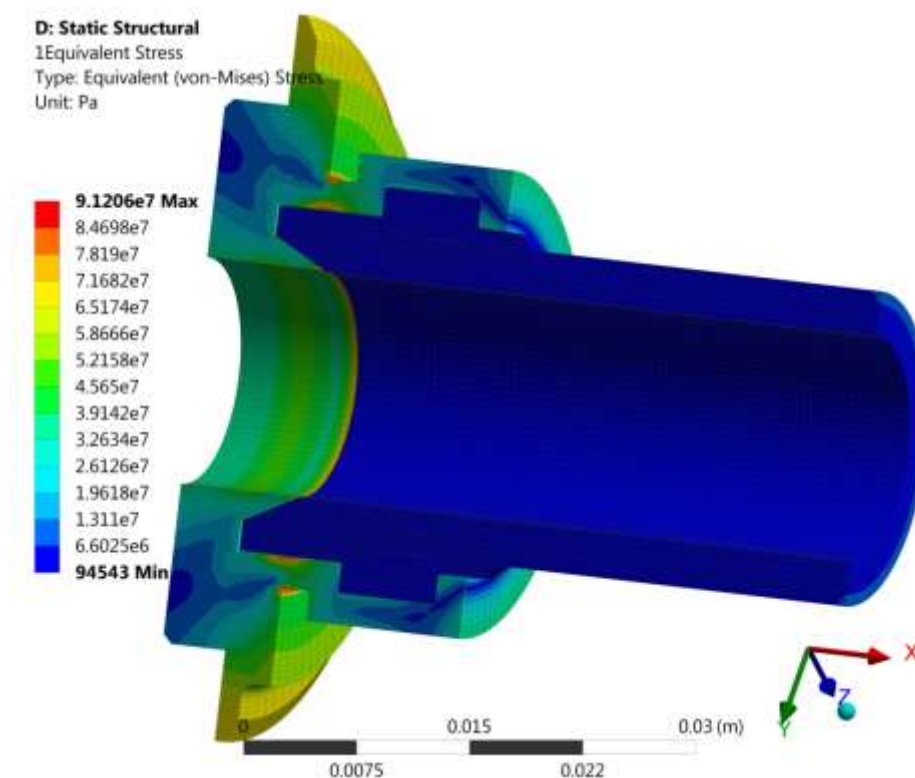


Рис.9.23. Эквивалентные напряжения в конструкции.

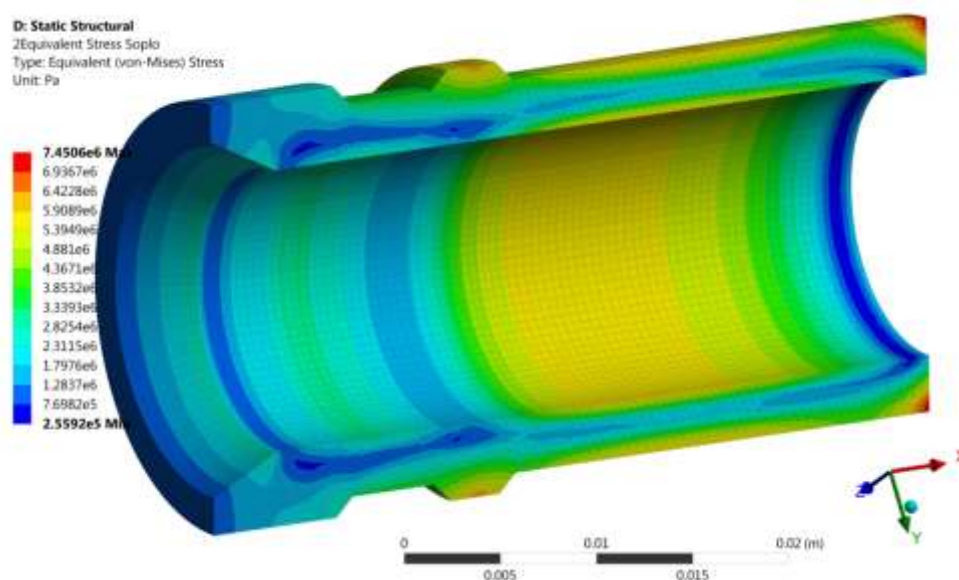


Рис. 9.24. Поле эквивалентных напряжений камеры сгорания.



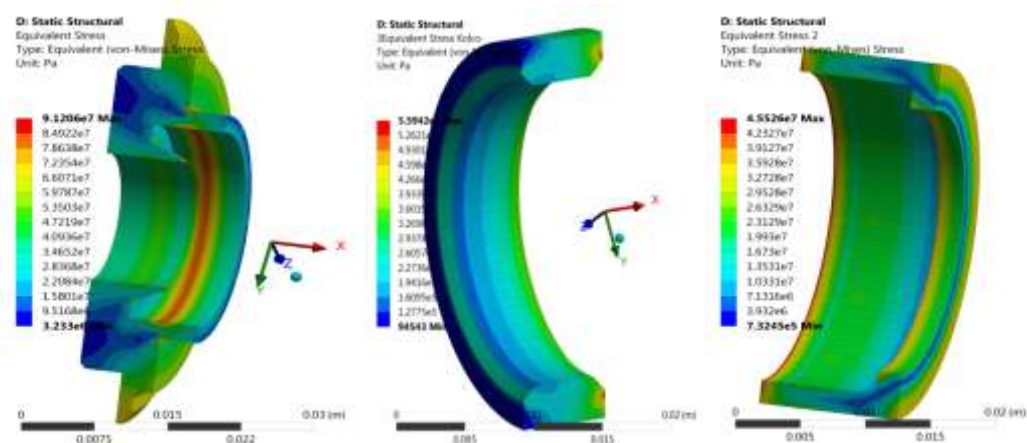


Рис. 9.25. Поле эквивалентных напряжений прижимного и переходного колец.

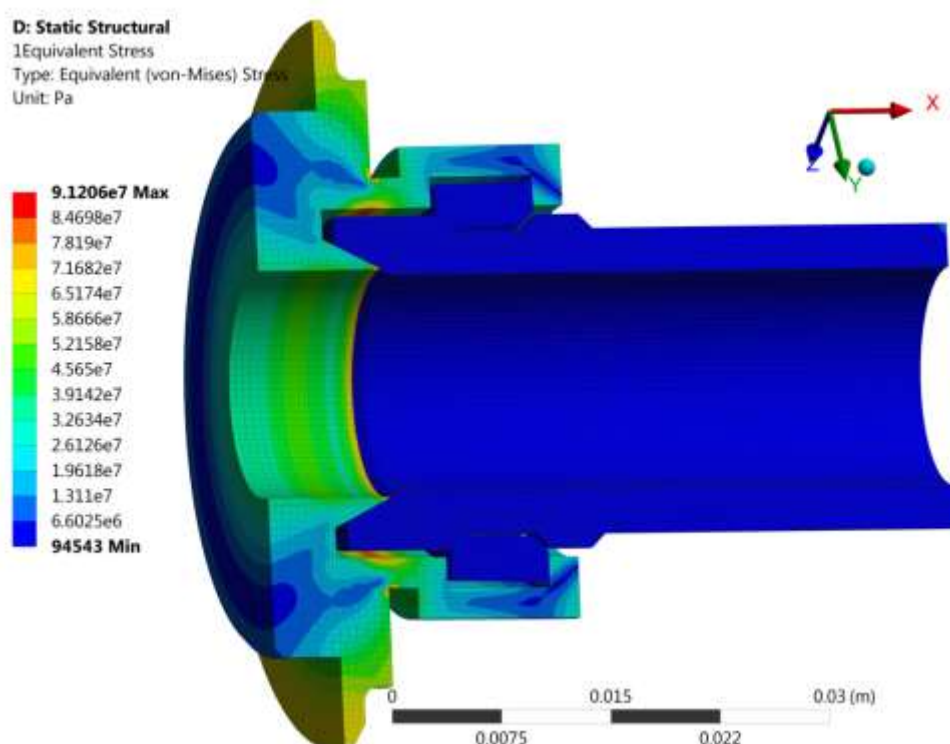


Рис.9.26.– Поле эквивалентных напряжений конструкции  
(в масштабе перемещений 5:1).

На рис. 9.23 – 9.26 приведены результаты расчета для значения угла сопряжения  $27^\circ$ . Подобные расчеты были выполнены для различных значений углов  $\alpha$  ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ) была отмечена тенденция к уменьшению значения межконтактного давления на величинах углов от  $15^\circ$  до  $35^\circ$ . Для этого диапазона углов был выполнен расчёт, в котором за параметр выбран угол  $\alpha$ , по которому происходит скольжение деталей. В результате расчёта были найдены величины

эквивалентных напряжений и давлений в зонах контакта в зависимости от величины угла  $\alpha$ . Результаты расчёта для сплавов ВТ-1, ВТ-5Л, ВТ-6Л, ВТ-9Л, ВТ-21Л, ВТ-3-1Л, ТВ-36, которые могут быть использованы для изготовления прижимного кольца, приведены на рис. 9.27 – 9.30.

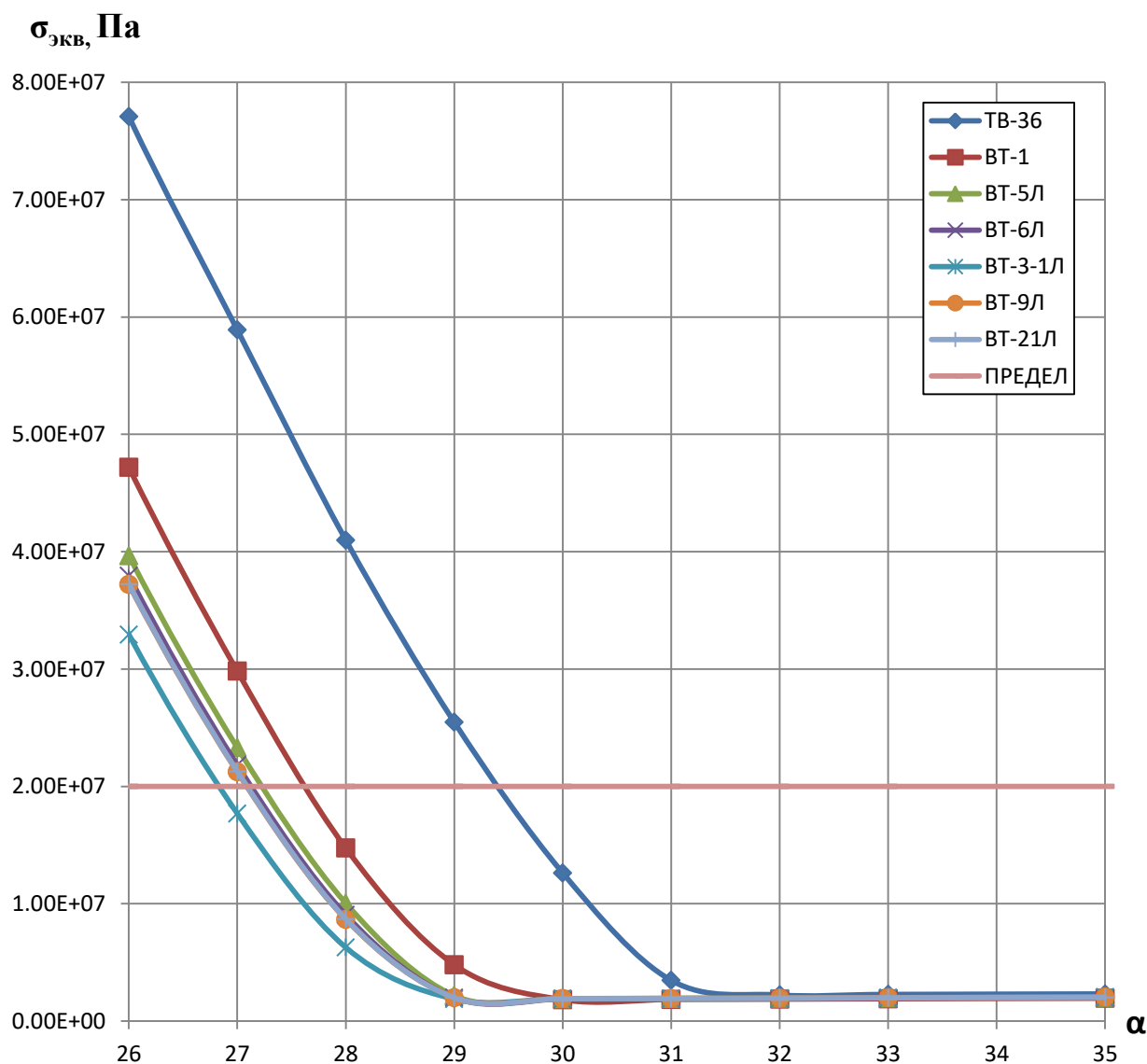


Рис.9.27. - График зависимости эквивалентных напряжений в композитной камере сгорания от угла сопряжения  $\alpha$ .

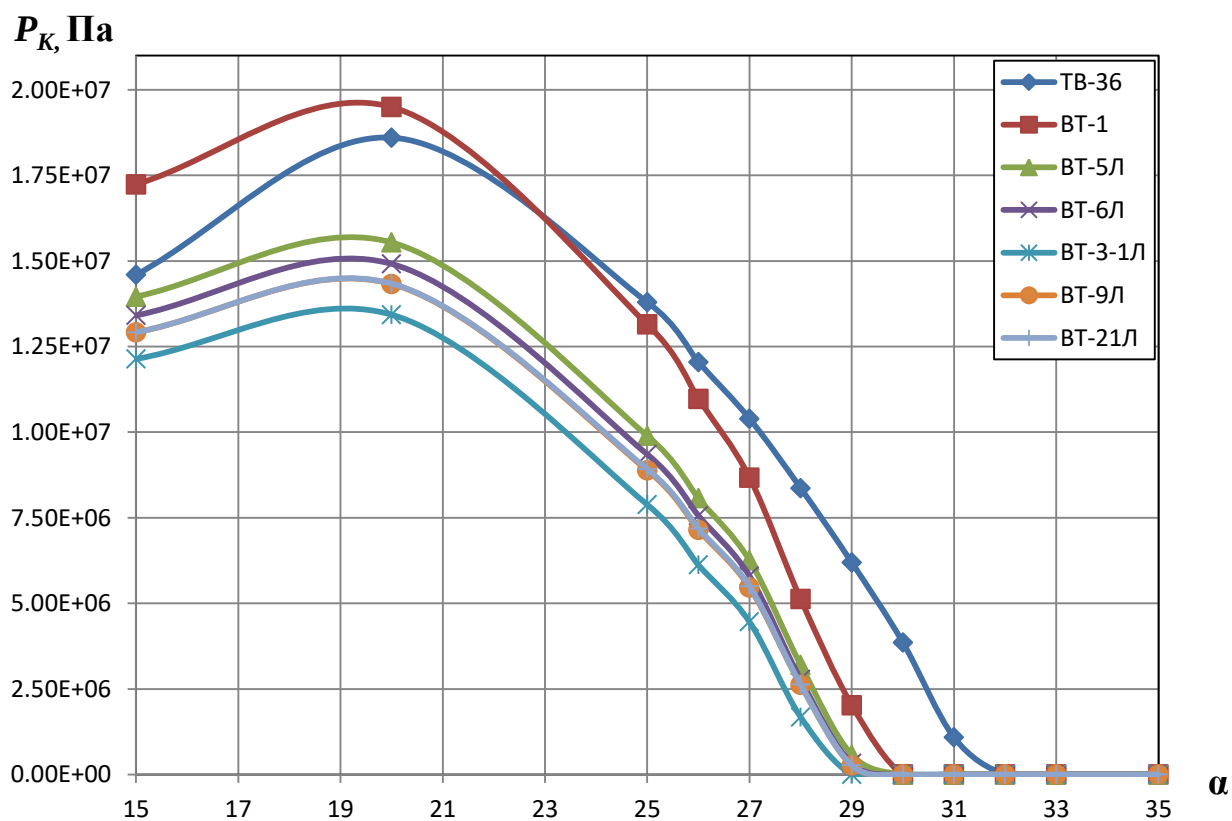


Рис.9.28. График зависимости давлений  $P_K$  в зоне контакта 1 от угла сопряжения  $\alpha$ .

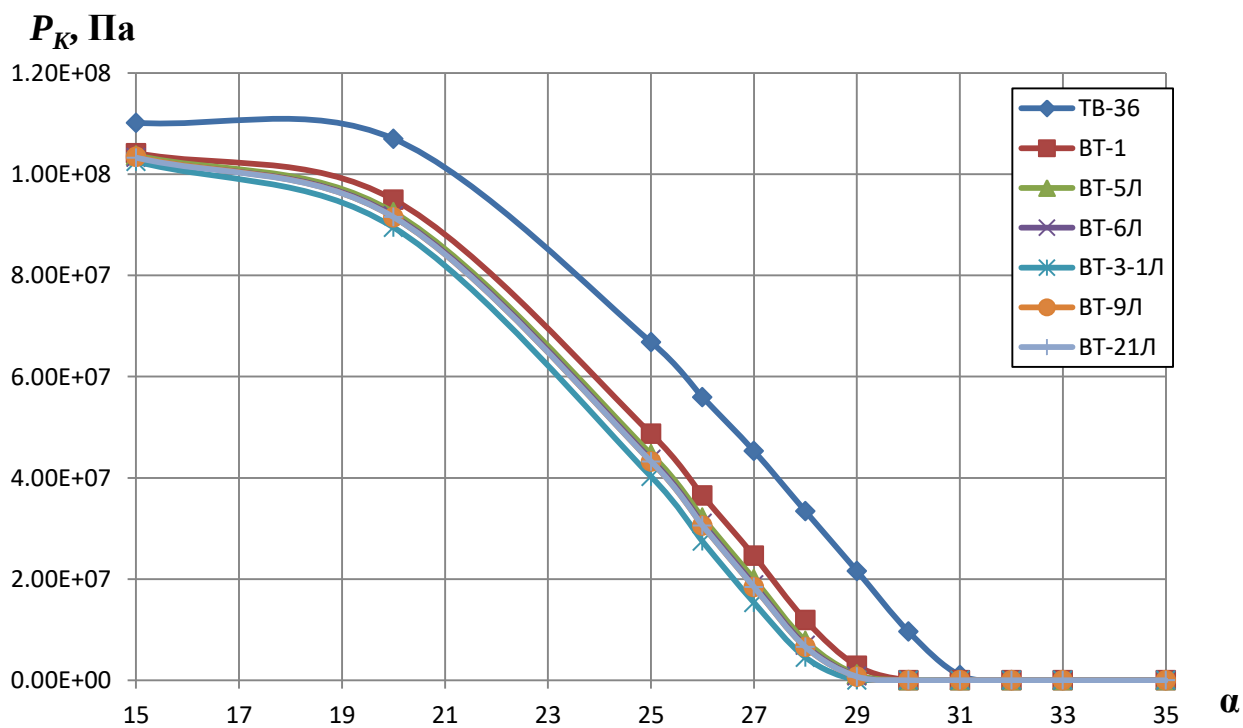


Рис.9.29 График зависимости давлений  $P_K$  в зоне контакта 2 от угла сопряжения  $\alpha$ .

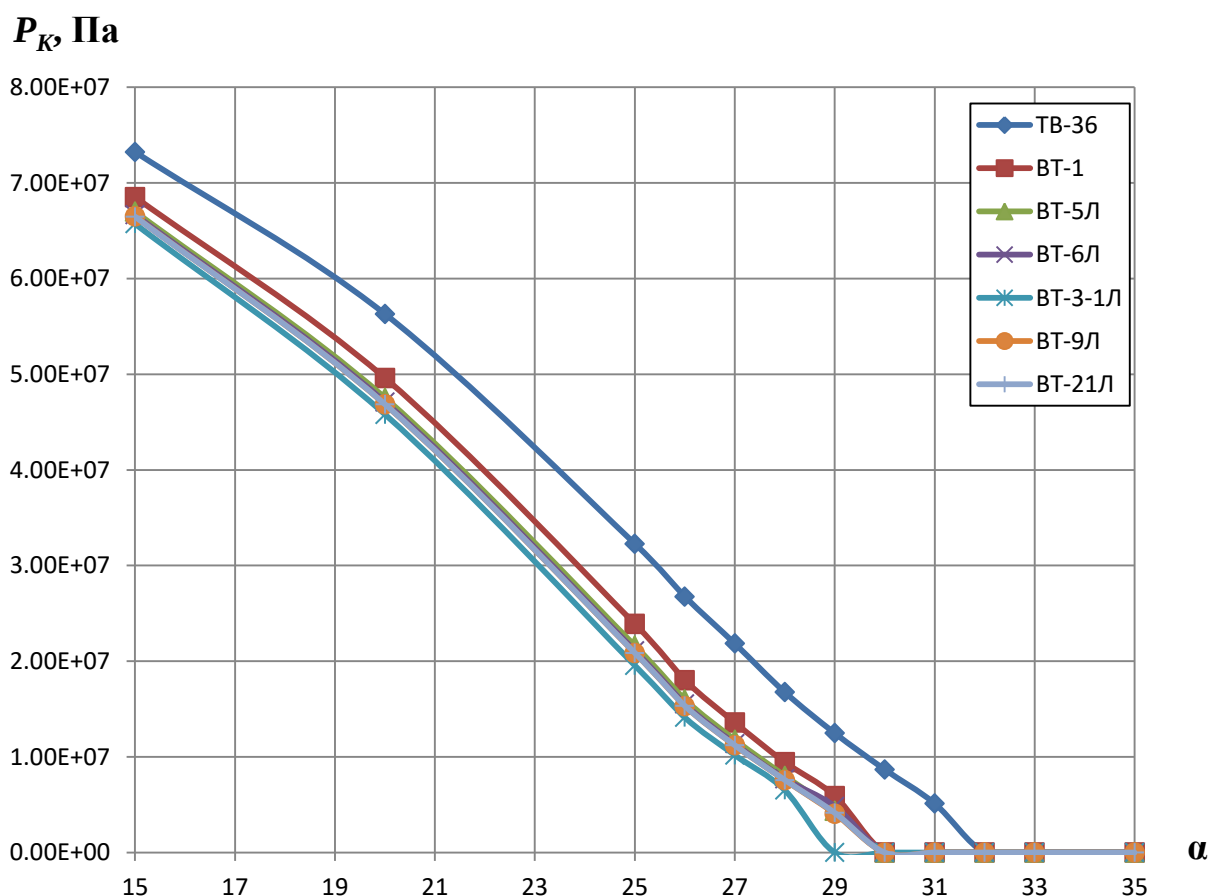


Рис.9.30. График зависимости давлений  $P_K$  в зоне контакта 3 от угла сопряжения  $\alpha$ .

По результатам расчета, представленным на рис. можно сделать вывод, что для рассматриваемой конструкции предпочтительные значения угла  $\alpha$  лежат в диапазоне углов от  $27^\circ$  до  $29^\circ$ .

Необходимо учесть тот факт, что при проведении расчета в первом приближении, теплонпряженного состояния конструкции было принято допущение о том, что контакт между соприкасающимися деталями идеальный, т.е. контактное термическое сопротивление (КТС) отсутствует. Но в реальности поверхности деталей представляют собой микрорельеф, соприкосновение которых происходит по вершинам его максимальных пиков. В результате, фактическая площадь контакта составляет значительно меньшую величину, чем номинальная площадь соприкосновения. Как следствие этого, при прохождении теплового потока через места фактического контакта возникает температурный напор. Для определения реального теплового режима конструкции необходимо

учитывать возникающий в месте контакта дополнительный перепад температур, обусловленный неидеальностью соединений. Знание значения КТС и межконтактного давления между рассматриваемыми парами материалов позволит учесть это явление при решении задачи и обосновать достоверность полученных в ходе решения результатов.

#### **9.1.7. Расчет контактного термического сопротивления в областях контакта деталей в конструкциях жидкостных ракетных двигателях малой тяги.**

##### **Экспериментальное определение параметров шероховатости контактирующих плоскостей**

Поскольку определение КТС традиционными методами для приведенной конструкции весьма затруднительно, то необходимо воспользоваться методикой, описанной в главе 3 и 4 диссертации.

Снятие профилограммы контактирующих поверхностей производилось с помощью профилометра *Surftest SJ-210*. Установка образцов в клиновом держателе представлена на рис. 9.31 и 9.32.



Рис.9.31. Установка композитной камеры сгорания в клиновом держателе.



Рис.9.32. Установка переходного кольца в клиновом держателе.

По результатам измерения шероховатости было выбрано среднее значение по трём измерениям. Профилограммы поверхностей композитной камеры сгорания и переходного кольца из титанового сплава представлены на рис. 9.33, 9.34.

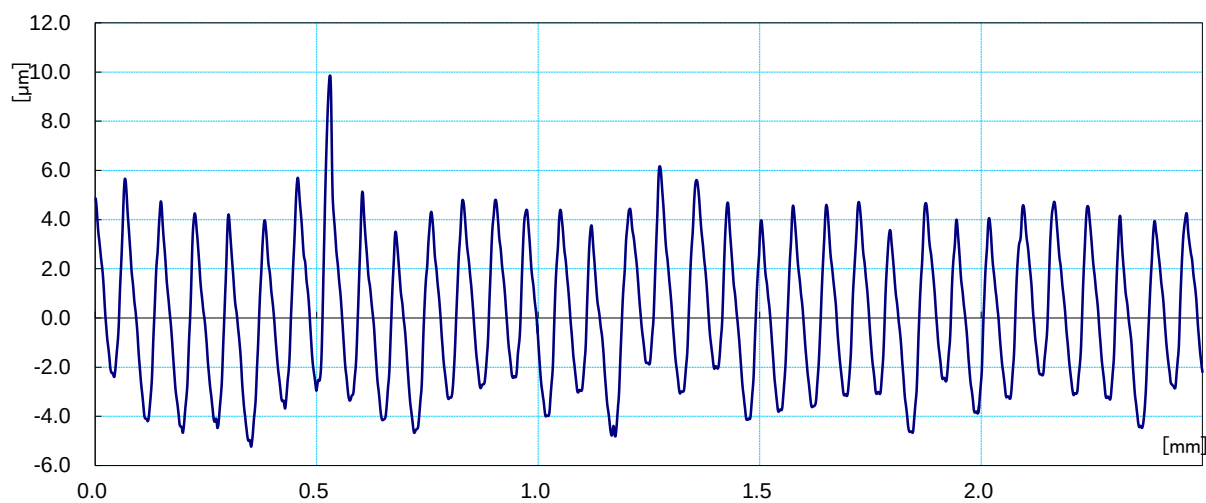


Рис.9.33. Шероховатость поверхности переходного кольца.

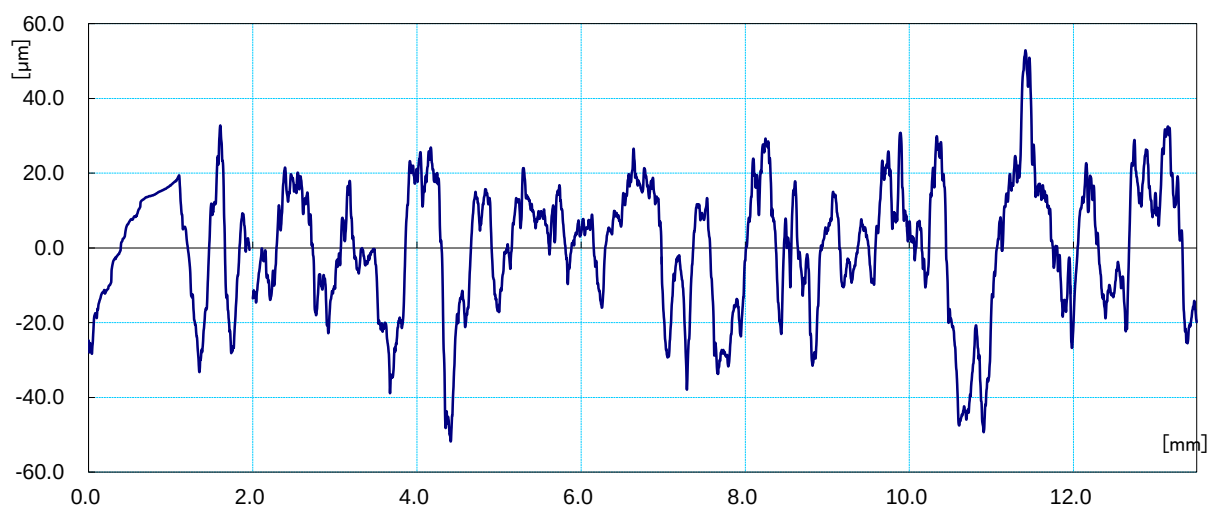


Рис.9.34. - Шероховатость поверхности композитной камеры сгорания.

Для наглядности, на рис. 9.35, 9.36 выполнено перестроение графиков в одной интервальной шкале.



Рис.9.35. Шероховатость камеры сгорания на интервале 2мм.

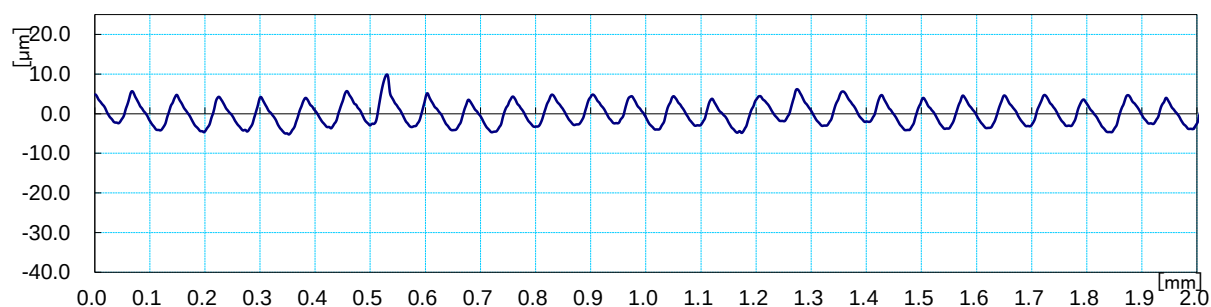


Рис.9.39. Шероховатость переходного кольца на интервале 2мм.

Как видно из приведенных графиков (Рис.9.35, 9.36) фактическая площадь контакта поверхностей композитной камеры сгорания и переходного кольца



будет существенно отличаться от номинальной площади контакта в связи с сильно различающимися высотами микровыступов.

По методике описанной в главе 3 построены трехмерные модели соприкасающихся поверхностей (Рис.9.37)

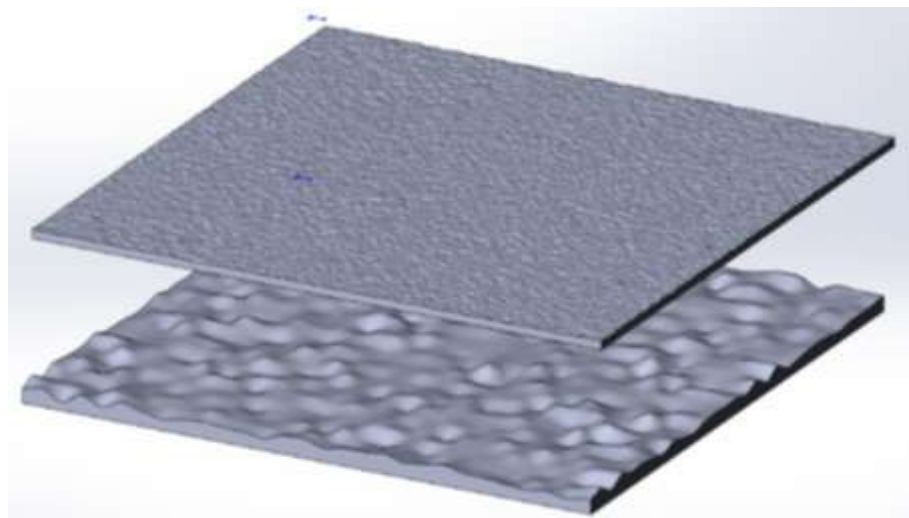


Рис.9.37. Шероховатость поверхности (сверху-вниз) ТВ-36 и КМК-МС.

Результаты построения сеточных моделей шероховатых поверхностей представлены на рис. 9.37 - 9.38.

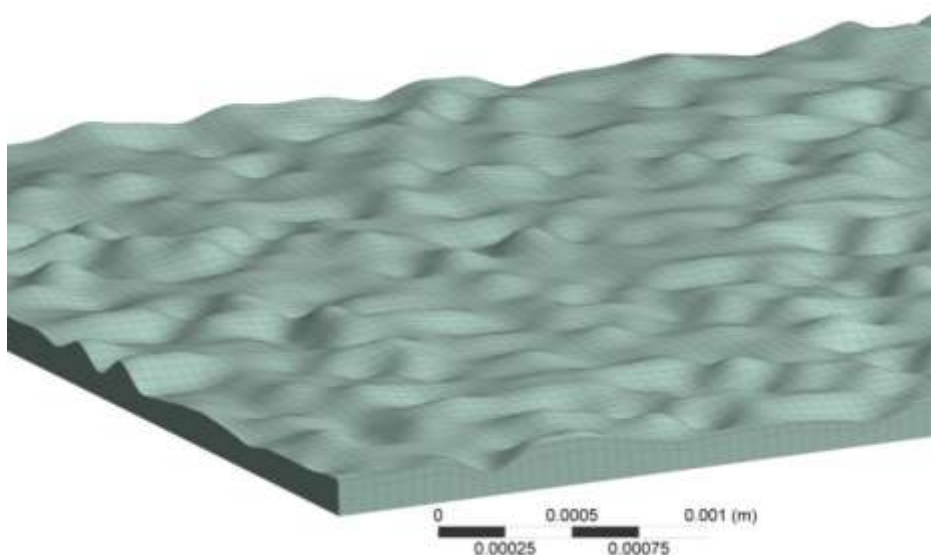


Рис. 9.37. Сеточная модель шероховатости с  $R_a=12.27$  мкм (изометрия).



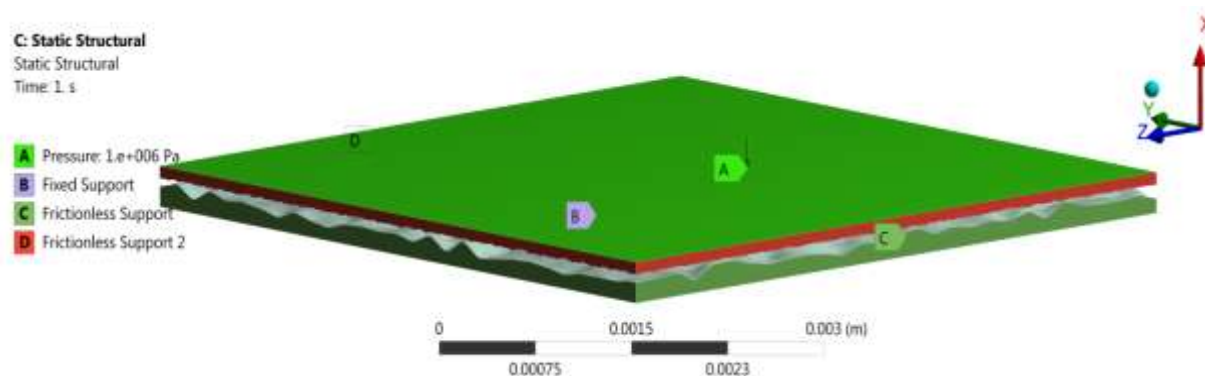


Рис. 9.38. Сеточная модель шероховатости с  $R_a=2.45$  мкм (изометрия).

### 9.2.2. Численное моделирование смещения поверхностей контакта

После передачи сеточной модели в модуль расчета для нее были заданы граничные условия следующего типа:

- к верхней границе приложено давление  $P$  (нагрузка  $A$ ), которое изменяется в диапазоне от 10 до 100 атм.,
- к боковым границам образцов приложены граничные условия скользящей заделки без трения (нагрузка  $C, D$ ),
- к нижней границе приложены граничные условия жесткой заделки (нагрузка  $B$ ) (Рис. 9.39).



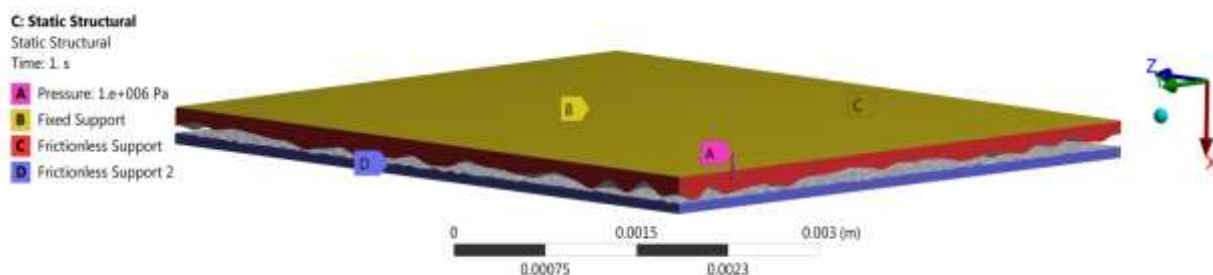


Рис. 9.39. Установка граничных условий.

По результатам прочностного анализа получены значения эквивалентных напряжений (Рис.9.40) и межконтактного давления, величина проникновения поверхности одной детали в поверхность другой детали.

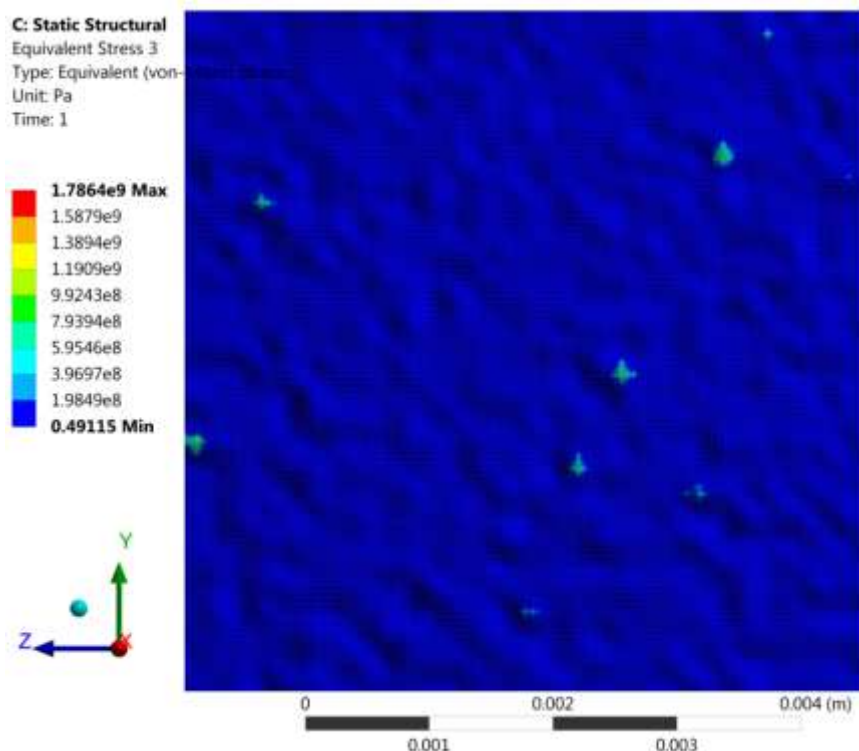


Рис. 9.40. Поле эквивалентных напряжений на поверхности КМК-МС для приложенного давления  $10^6$  Па.

Для каждого значения давлений (10, 20, 30...) выполнялось как минимум 10 подшагов расчета, и в дальнейшем, путем параметризации приложенного давления, рассчитаны значения перемещения координаты верхней плоскости для нахождения величины проникновения поверхности детали в поверхность другой детали.

Поле эквивалентных напряжений на поверхности КМК-МС для давления  $10^7$  Па представлено на рисунке 9.41.

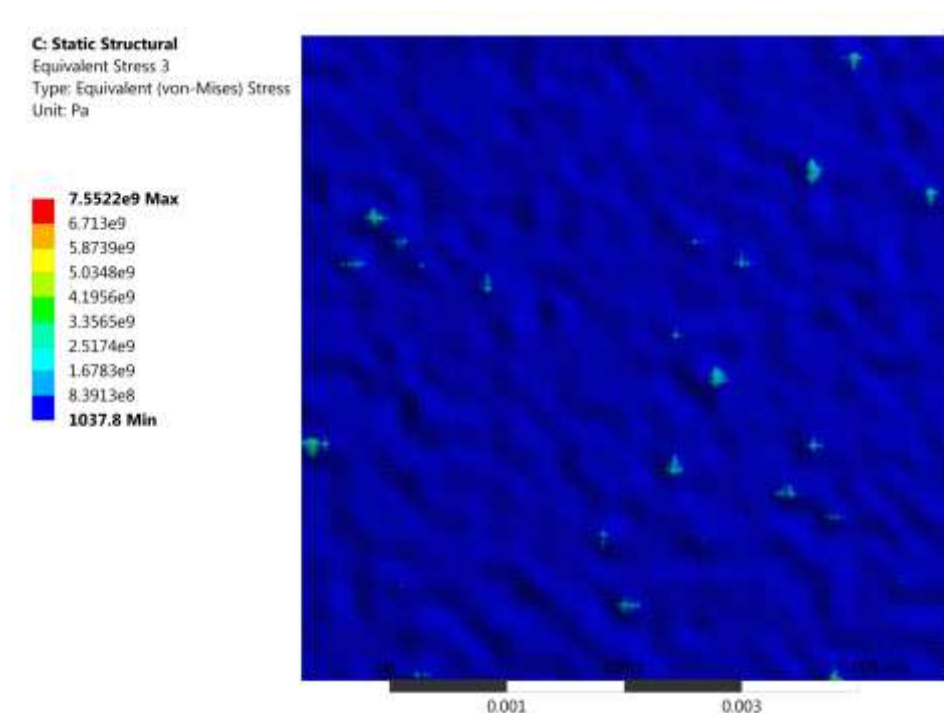


Рис. 9.41.- Поле эквивалентных напряжений на поверхности КМК-МС для приложенного давления  $10^7$  Па.

В результате прочностного расчета получена величина смещения верхней поверхности относительно нижней, необходимая для определения фактической площади касания двух шероховатых поверхностей. Величины смещения для контактирующих пар, в зависимости от приложенного давления приведены в таблице 9.2.

Таблица 9.2.

Зависимость смещения от приложенного давления.

| Пары материалов | КМК-МС<br>12X18H10T  | КМК-МС<br>ТВ-36      | КМК-МС<br>КМК-МС     | 12X18H10T<br>ТВ-36   |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Давление, МПа   | Смещение, м          |                      |                      |                      |
| 1.00            | $4.78 \cdot 10^{-6}$ | $5.24 \cdot 10^{-6}$ | $7.21 \cdot 10^{-6}$ | $1.85 \cdot 10^{-6}$ |
| 2.00            | $6.21 \cdot 10^{-6}$ | $6.82 \cdot 10^{-6}$ | $8.60 \cdot 10^{-6}$ | $2.36 \cdot 10^{-6}$ |
| 3.00            | $7.19 \cdot 10^{-6}$ | $7.87 \cdot 10^{-6}$ | $9.77 \cdot 10^{-6}$ | $2.68 \cdot 10^{-6}$ |
| 4.00            | $7.96 \cdot 10^{-6}$ | $8.67 \cdot 10^{-6}$ | $1.06 \cdot 10^{-5}$ | $2.93 \cdot 10^{-6}$ |
| 5.00            | $8.60 \cdot 10^{-6}$ | $9.35 \cdot 10^{-6}$ | $1.13 \cdot 10^{-5}$ | $3.13 \cdot 10^{-6}$ |
| 6.00            | $9.14 \cdot 10^{-6}$ | $9.93 \cdot 10^{-6}$ | $1.21 \cdot 10^{-5}$ | $3.31 \cdot 10^{-6}$ |
| 7.00            | $9.63 \cdot 10^{-6}$ | $1.04 \cdot 10^{-5}$ | $1.27 \cdot 10^{-5}$ | $3.47 \cdot 10^{-6}$ |
| 8.00            | $1.01 \cdot 10^{-5}$ | $1.09 \cdot 10^{-5}$ | $1.34 \cdot 10^{-5}$ | $3.65 \cdot 10^{-6}$ |
| 9.00            | $1.05 \cdot 10^{-5}$ | $1.13 \cdot 10^{-5}$ | $1.40 \cdot 10^{-5}$ | $3.79 \cdot 10^{-6}$ |
| 10.00           | $1.08 \cdot 10^{-5}$ | $1.17 \cdot 10^{-5}$ | $1.46 \cdot 10^{-5}$ | $3.92 \cdot 10^{-6}$ |

**Численное моделирование температурных полей.**

Для контроля распределения температурного поля в зависимости от приложенного теплового потока параметры расчета были установлены на разбиение одного шага расчета на 10 подшагов. В результате проведения теплового анализа получено поле температур, направление и величина теплового потока в контактирующих поверхностях. На рис. 9.42 – 9.44 представлено распределение температурного поля контактирующих поверхностей.

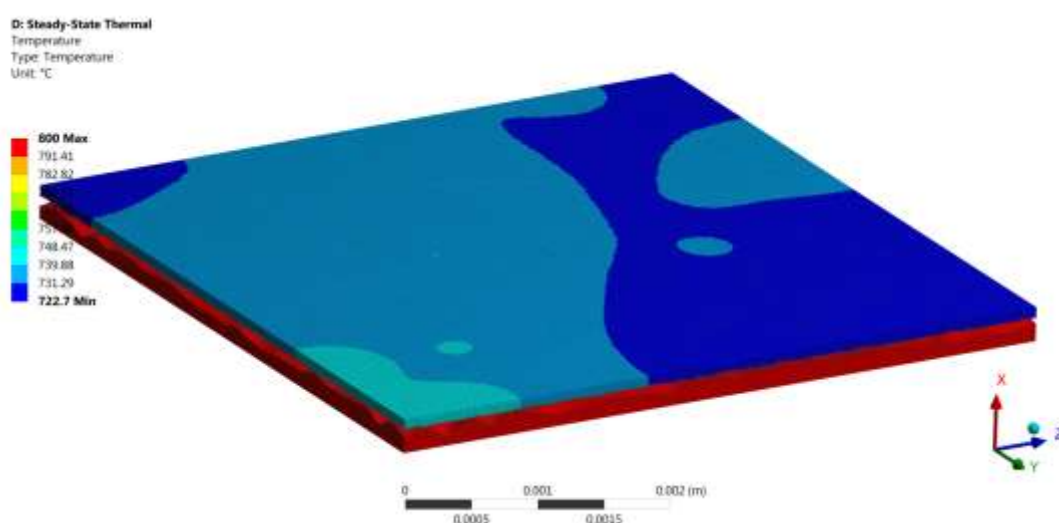


Рис. 9.42. Распределение температурного поля в контактной паре КМК-МС – 12X10H8T при межконтактном давлении  $5 \cdot 10^6$  Па.

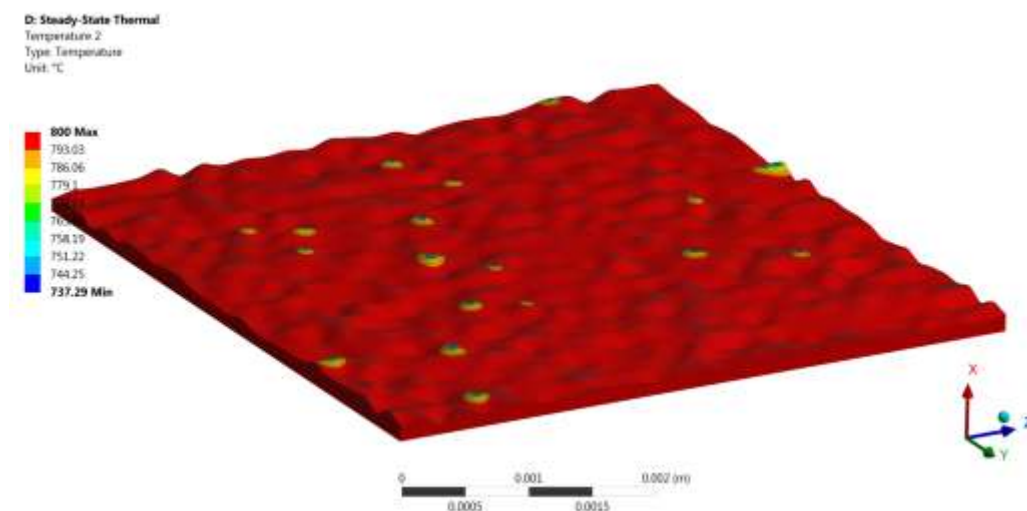


Рис. 9.43. Распределение температурного поля на поверхности КМК-МС при межконтактном давлении  $5 \cdot 10^6$  Па.

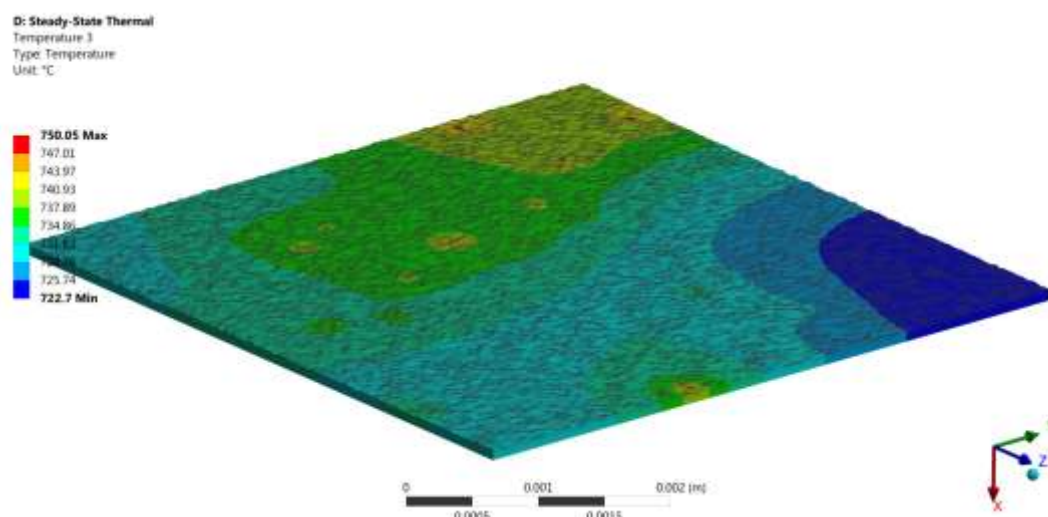


Рис. 9.44. Распределение температурного поля на поверхности 12X18H10T при межконтактном давлении  $5 \cdot 10^6$  Па.

Полученные значения температур в контактирующих поверхностях использовались для расчета КТС между соответствующими парами материалов. Значения температур для каждой контактной пары приведены в таблице 9.3:

Таблица 9.3.

## Значения температуры в контактных парах

| Пары<br>материалов | КМК-МС -<br>12X18H10T |               | КМК-МС -<br>ТВ-36 |        | 12X18H10T -<br>ТВ-36 |        | КМК-МС -<br>КМК-МС |        |
|--------------------|-----------------------|---------------|-------------------|--------|----------------------|--------|--------------------|--------|
|                    | КМК-<br>МС            | 12X18H<br>10T | КМК-<br>МС        | ТВ-36  | 12X18H<br>10T        | ТВ-36  | КМК-МС             | КМК-МС |
| Давление,<br>МПа   | T, C°                 | T, C°         | T, C°             | T, C°  | T, C°                | T, C°  | T, C°              | T, C°  |
| 1.00               | 719.10                | 635.24        | 796.85            | 752.44 | 756.60               | 708.95 | 625.78             | 438.75 |
| 2.00               | 752.25                | 698.07        | 798.20            | 766.98 | 770.06               | 734.17 | 673.43             | 524.55 |
| 3.00               | 755.11                | 713.14        | 798.47            | 774.67 | 779.77               | 756.01 | 719.14             | 587.49 |
| 4.00               | 768.73                | 733.72        | 798.45            | 769.98 | 783.54               | 765.13 | 728.34             | 609.25 |
| 5.00               | 768.64                | 738.22        | 798.98            | 780.75 | 786.65               | 770.49 | 735.13             | 624.08 |
| 6.00               | 776.15                | 749.03        | 799.15            | 782.60 | 788.97               | 777.46 | 739.56             | 634.46 |
| 7.00               | 780.15                | 755.54        | 798.97            | 785.33 | 790.76               | 781.03 | 742.99             | 642.51 |
| 8.00               | 782.75                | 760.13        | 799.02            | 786.49 | 791.40               | 782.05 | 745.31             | 648.92 |
| 9.00               | 784.68                | 763.67        | 799.15            | 787.19 | 792.55               | 785.53 | 748.50             | 654.90 |
| 10.00              | 785.45                | 765.79        | 799.23            | 787.91 | 792.70               | 785.89 | 751.95             | 675.57 |

Полученные при моделировании значения контактного термического сопротивления  $R_K$  для безвоздушной среды были верифицированы по известным аналитическим зависимостям [4-7].

Для каждой пары материалов произведен расчет значений КТС. Поскольку значения КТС, вычисленные по методике Попова В.М. [6] для вакуума значительно превышают значения всех других авторов, то эти данные не были отражены на графиках. Графики зависимостей КТС от приложенного давления представлены на рис. 9.45 – 9.48.

$R_K \cdot 10^4,$   
 $\text{К} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$

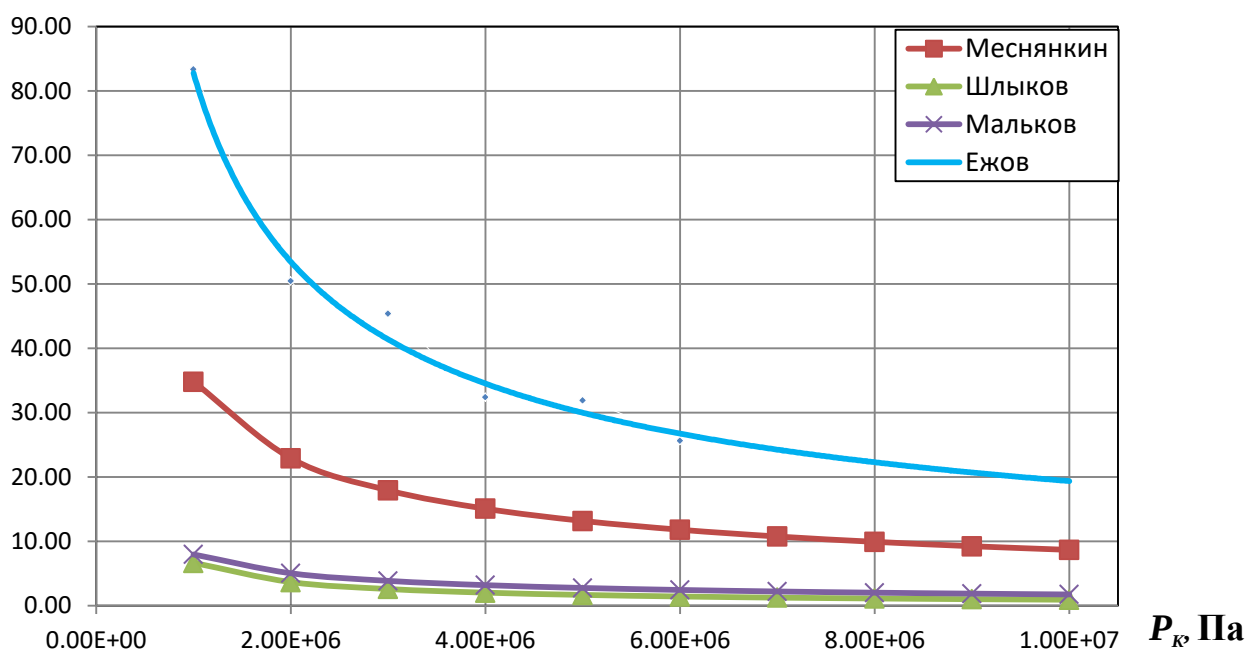


Рис. 9.45. График зависимости  $R_K$  от  $P_K$  для контактной пары КМК-МС - 12Х18Н10Т.

$R_K \cdot 10^4,$   
 $\text{К} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$

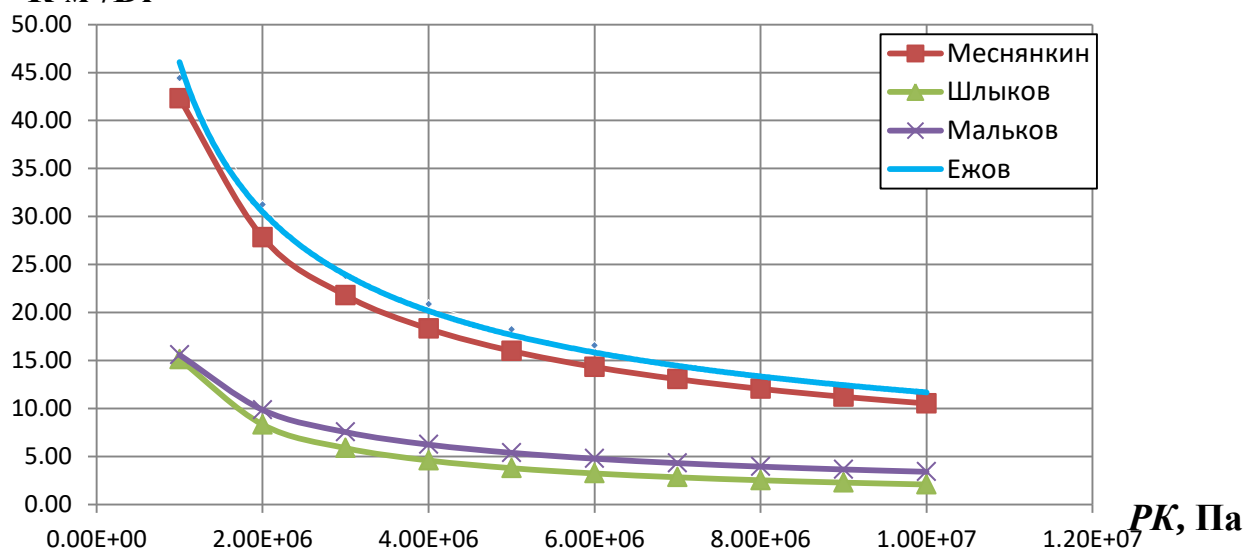


Рис. 9.49. – График зависимости  $R_K$  от  $P_K$  для контактной пары КМК-МС – ТВ-36.

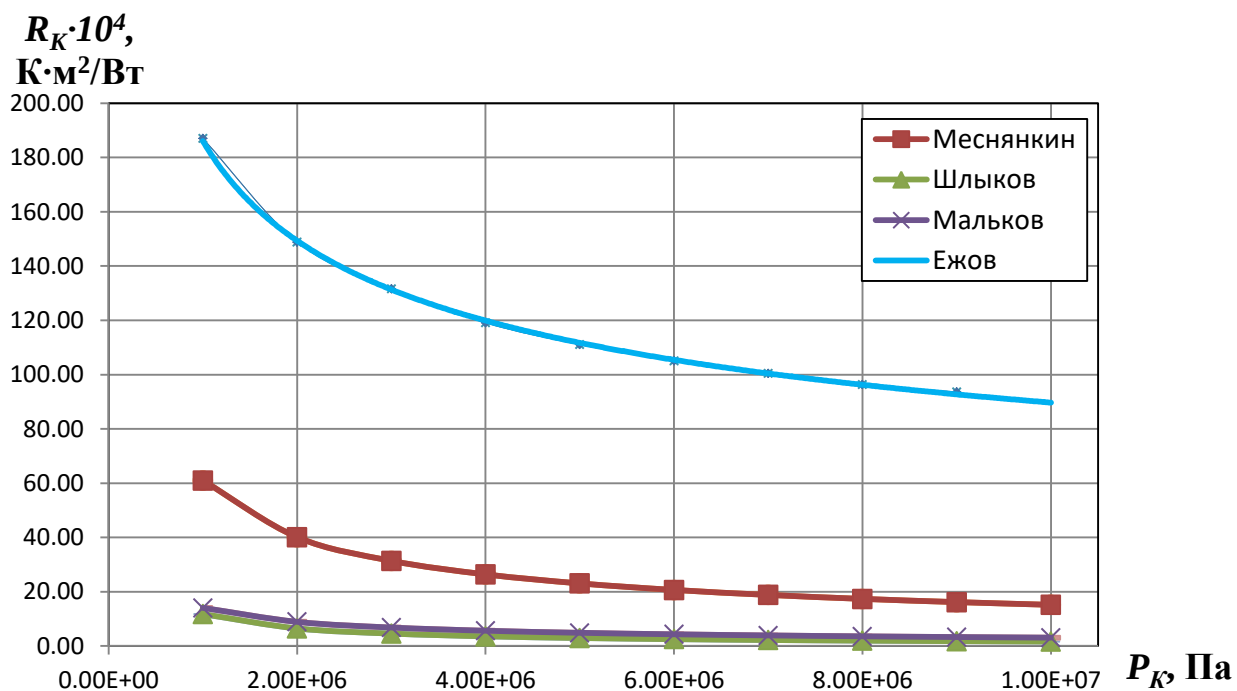


Рис. 9.47– График зависимости  $R_K$  от  $P_K$  для контактной пары КМК-МС – КМК-МС.

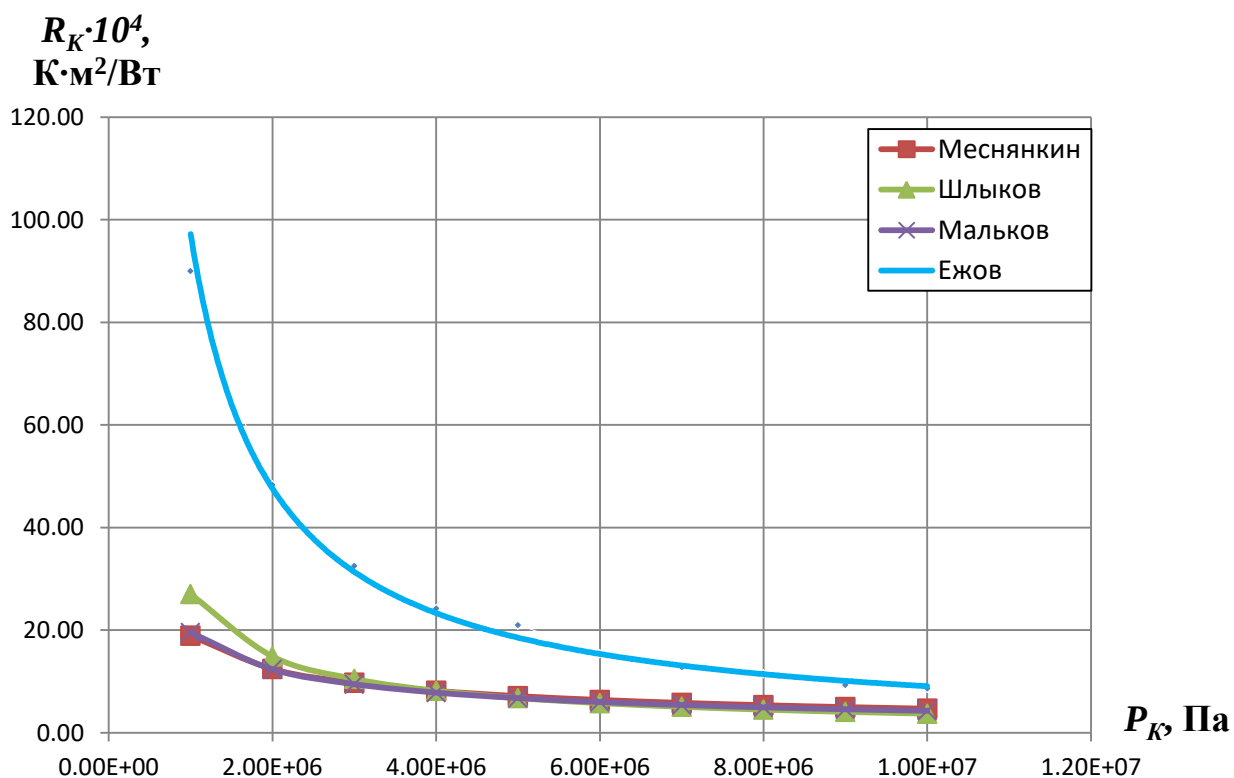


Рис. 9.48– График зависимости  $R_K$  от  $P_K$  для контактной пары ТВ-36 - 12Х18Н10Т.

Различие в значениях КТС между полученными по зависимостям, рекомендованными другими авторами, и рассчитанными по реальной микрогеометрии обусловлено прежде всего тем, что в рассмотренных работах



пятна контакта для различных типов материалов принимались постоянного размера, что не отражает физической сущности контакта твердых тел. К недостатком проанализированных зависимостей также можно отнести то обстоятельство, что они предлагались авторами только для определенного круга материалов при фиксированных диапазонах изменения безразмерной механической нагрузки.

В таблице 9.4. приведены результаты расчета значений КТС рассматриваемых пар материалов для различных давлений.

Таблица 9.4.

Значения КТС пар материалов

| Пары материалов | КМК-МС<br>12X18H10T                        | КМК-МС<br>ТВ-36                            | КМК-МС<br>КМК-МС                           | 12X18H10T<br>ТВ-36                         |
|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Давление,<br>Па | $R_K \cdot 10^4$ ,<br>К·м <sup>2</sup> /Вт | $R_K \cdot 10^4$ ,<br>К·м <sup>2</sup> /Вт | $R_K \cdot 10^4$ ,<br>К·м <sup>2</sup> /Вт | $R_K \cdot 10^4$ ,<br>К·м <sup>2</sup> /Вт |
| 1.00            | 83,85                                      | 44,41                                      | 187,03                                     | 88,95                                      |
| 2.00            | 54,18                                      | 31,22                                      | 148,88                                     | 48,36                                      |
| 3.00            | 41,97                                      | 23,81                                      | 131,65                                     | 32,54                                      |
| 4.00            | 35,01                                      | 20,85                                      | 119,09                                     | 24,27                                      |
| 5.00            | 30,42                                      | 18,23                                      | 111,05                                     | 19,57                                      |
| 6.00            | 27,12                                      | 16,55                                      | 105,09                                     | 15,47                                      |
| 7.00            | 24,61                                      | 13,64                                      | 100,48                                     | 12,84                                      |
| 8.00            | 22,62                                      | 12,53                                      | 96,40                                      | 11,51                                      |
| 9.00            | 21,01                                      | 11,96                                      | 93,60                                      | 9,32                                       |
| 10.00           | 19,66                                      | 11,32                                      | 90,52                                      | 8,67                                       |

Таким образом, имея величину контактного термического сопротивления для рассматриваемых пар материалов в широком диапазоне давлений, можно с определенной достоверностью рассчитать тепловое состояние конструкции при реальных условиях контактирования.

### 9.1.8. Расчет теплонапряженного состояния конструкции малой камеры сгорания с учетом значения КТС между соприкасающимися деталями

Опираясь на результаты проведенного предварительного расчета, ( разделы 9.1, 9.2) температурного и механического состояния конструкции в процессе эксплуатации и учитывая рассчитанные значения КТС, произведен уточненный расчет конструкции камеры сгорания ЖРД МТ с задаваемым углом сопряжения. На рисунке 9.50 представлена сравнительная картина формирования температурных полей с учетом и без учета КТС.

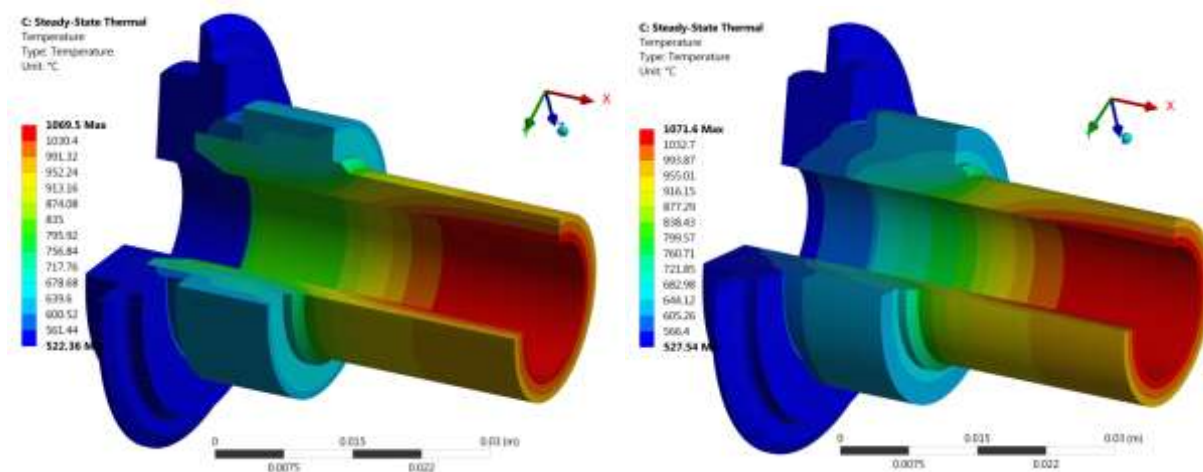


Рис.9.50 – Картина формирования температурных полей с учетом (слева) и без учета (справа) КТС.

После определения температурных полей, выполнен повторный механический анализ с условием тепловой нагрузки. Картины формирования эквивалентных напряжений в конструкции, и ее деталях для угла сопряжения  $\alpha=27^\circ$  представлены на рис. 9.51 - 9.54.

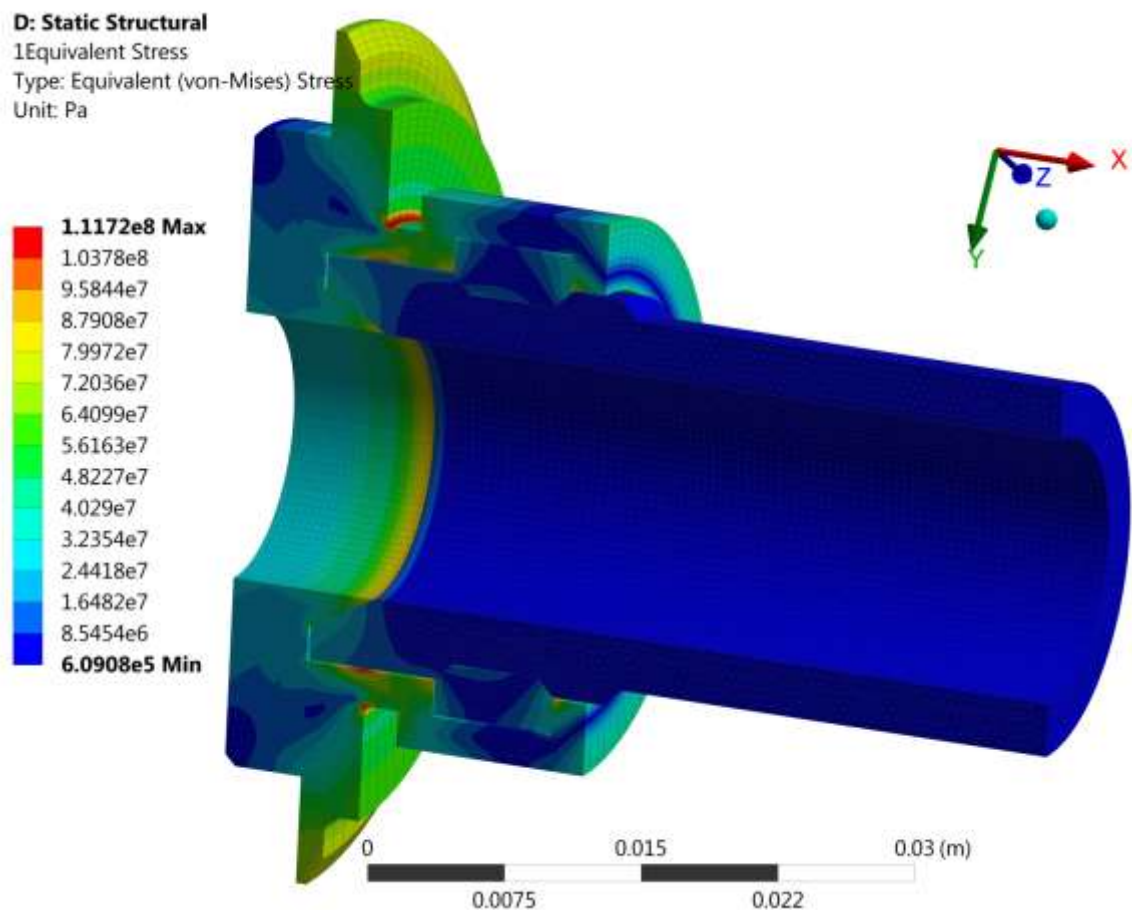


Рис.9.51 Эквивалентные напряжения в конструкции с учетом  $R_K$ .

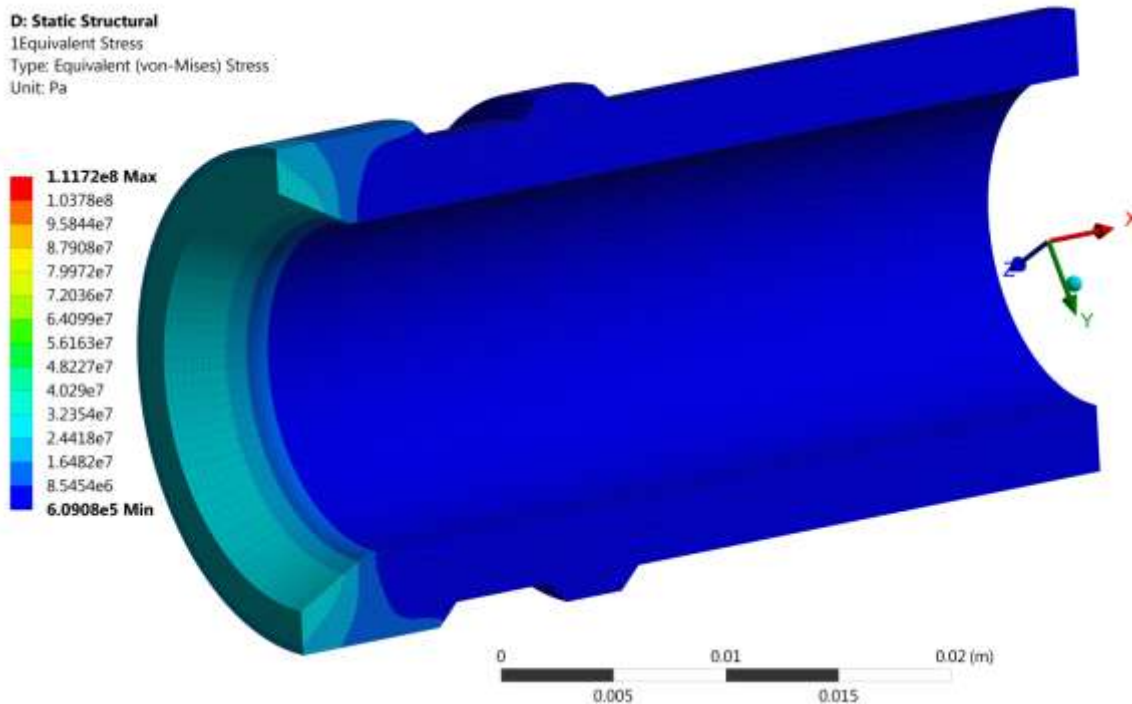


Рис. 9.52 Поле эквивалентных напряжений камеры сгорания с учетом  $R_K$ .

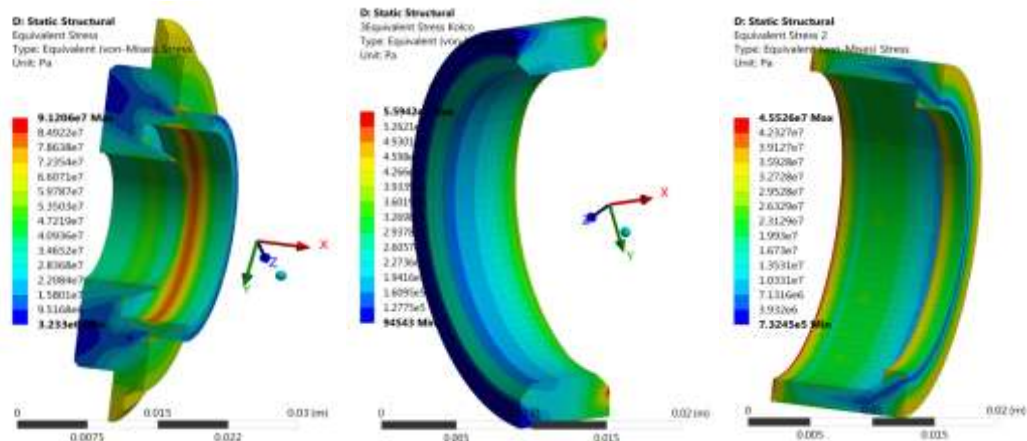


Рис. 9.53 Поле эквивалентных напряжений прижимного и переходного колец с учетом  $R_K$ .

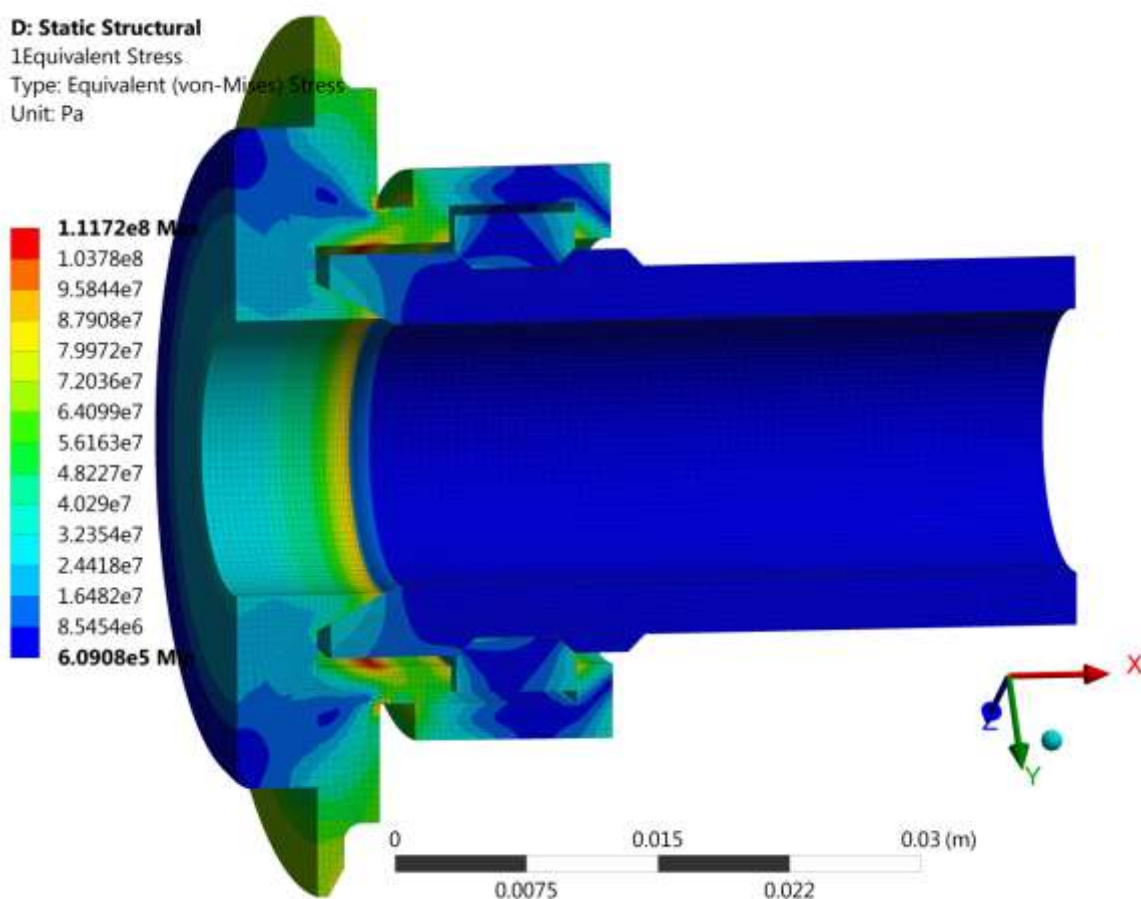


Рис.9.54 Поле эквивалентных напряжений конструкции (в масштабе перемещений 5:1) с учетом  $R_K$ .

Величины эквивалентных напряжений и давлений в зонах контактов в зависимости от величины угла  $\alpha$  для сплавов ВТ-1, ВТ-5Л, ВТ-6Л, ВТ-9Л, ВТ-21Л, ВТ-3-1Л, ТВ-36, приведены на рис. 9.55 – 9.58.

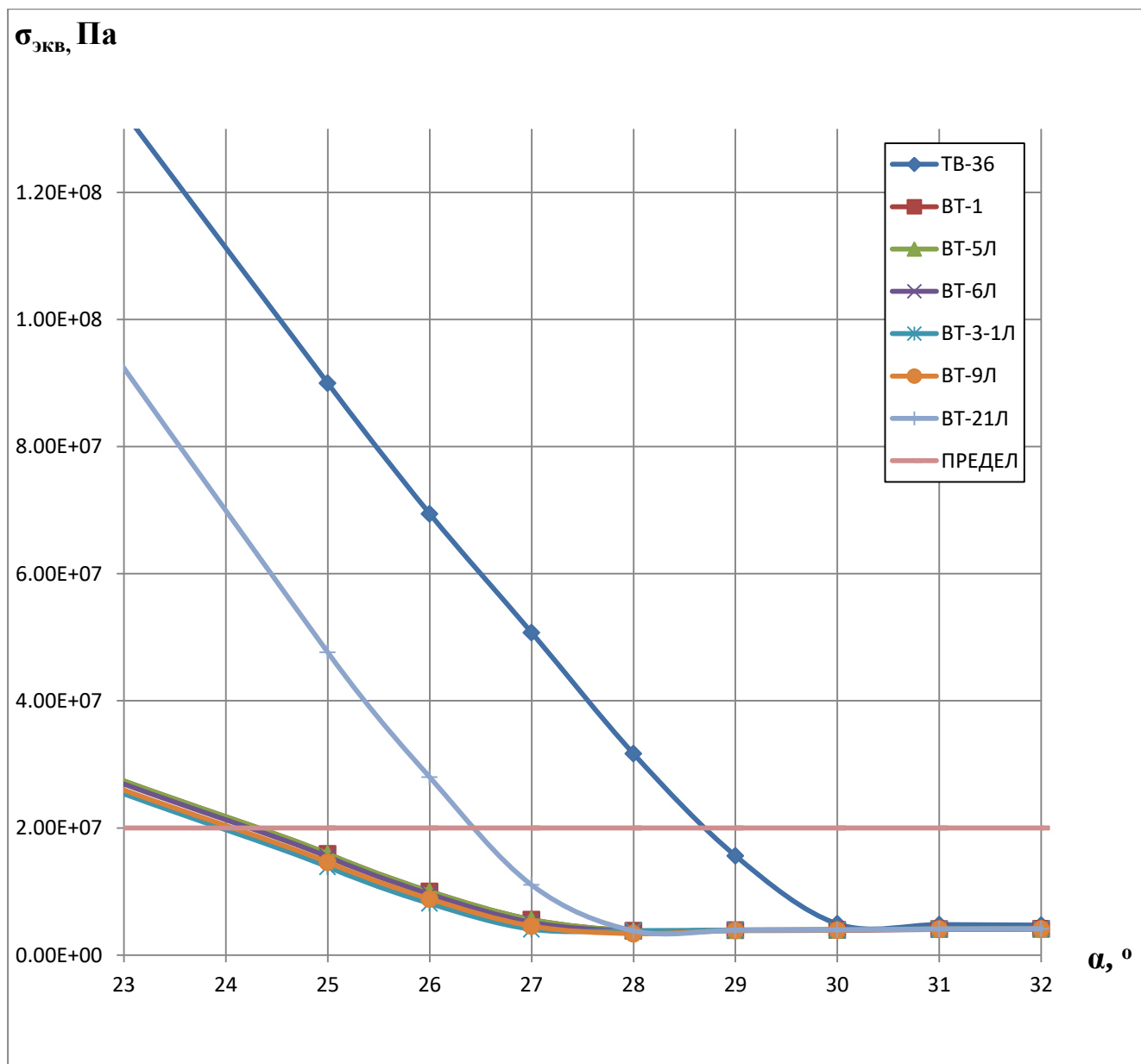


Рис.9.55. График зависимости эквивалентных напряжений в композитной камере сгорания от угла сопряжения  $\alpha$  с учетом  $R_K$ .

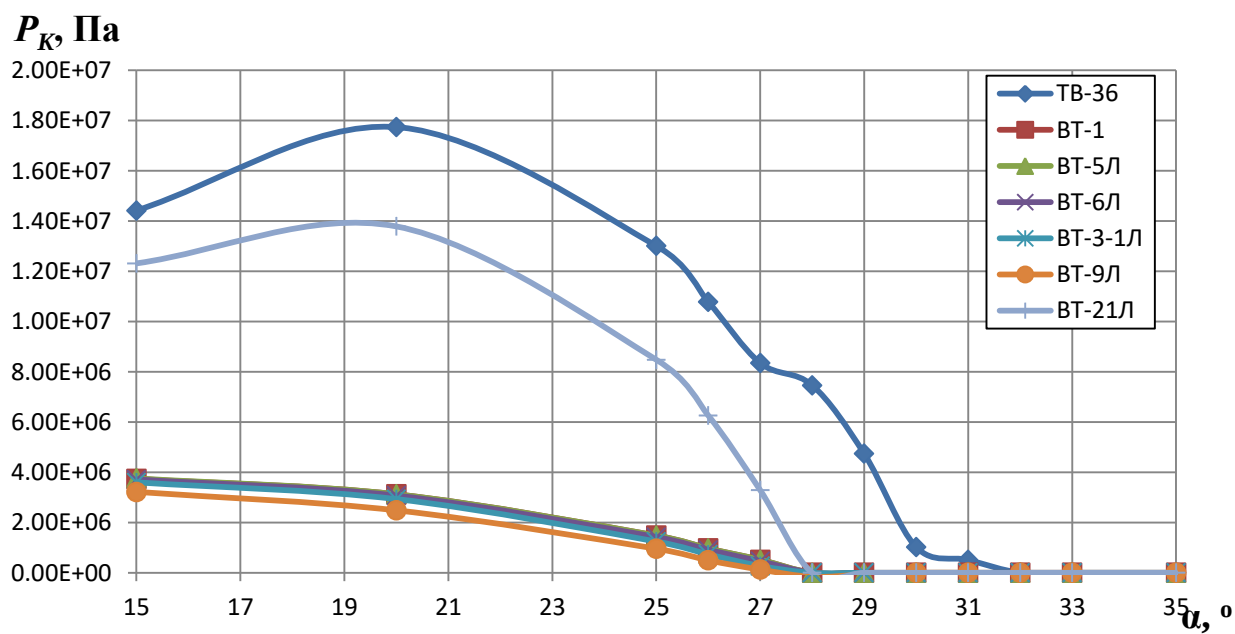


Рис.9.56. - График зависимости давлений  $P_K$  в зоне контакта 1 от угла сопряжения  $\alpha$  с учетом  $R_K$ .

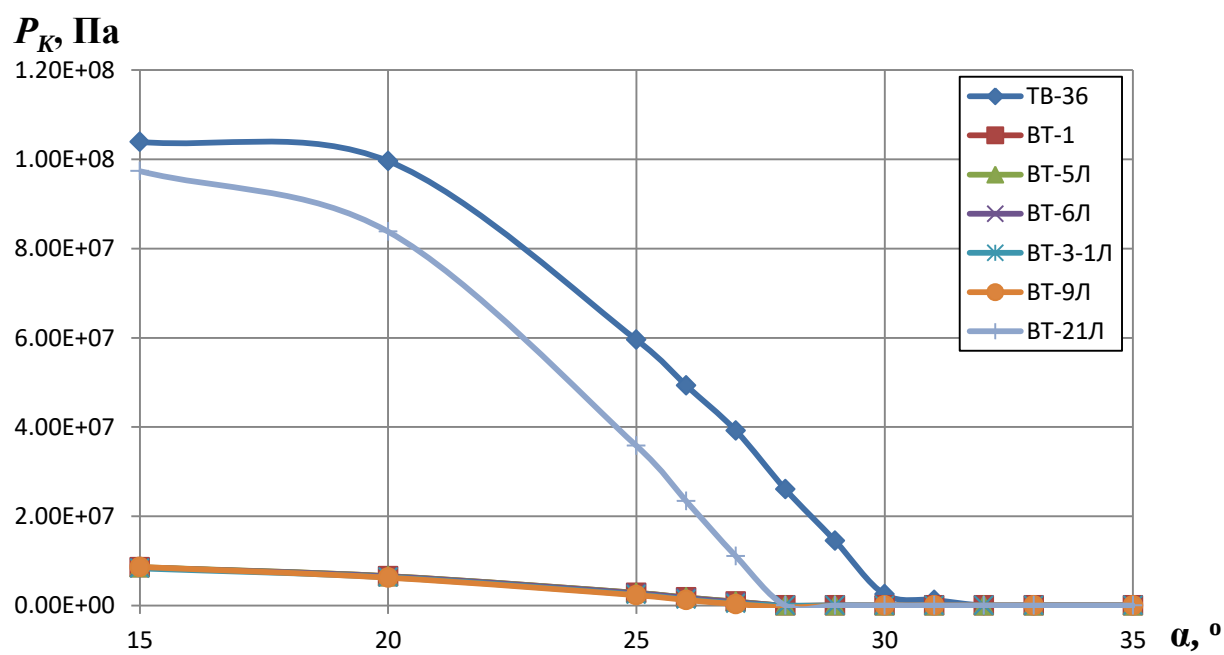


Рис.9.57. -График зависимости давлений  $P_K$  в зоне контакта 2 от угла сопряжения  $\alpha$  с учетом  $R_K$ .

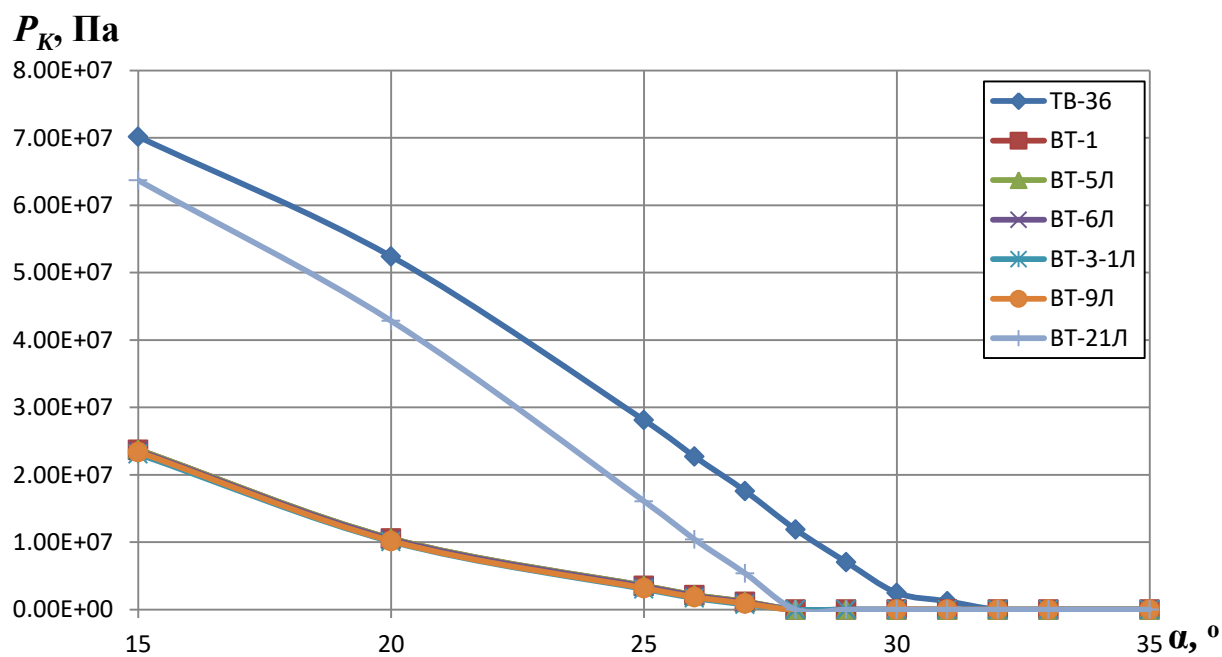


Рис.9.58. График зависимости давлений  $P_K$  в зоне контакта 3 от угла сопряжения  $\alpha$  с учетом  $R_K$ .

По результатам, представленным на рис. 9.55 – 9.58 можно сделать вывод, что для рассматриваемой конструкции предпочтительные значения угла  $\alpha$  лежат в диапазоне от  $25^\circ$  до  $27^\circ$ , а материалы можно выбрать из ВТ-1, ВТ-5Л, ВТ-6Л, ВТ-9Л, ВТ-3-1Л.

## 9.2. Расчет тепловых процессов в конструкциях лопатка-диск газотурбинного двигателя

### 9.2.1. Постановка задачи исследования

Исследуемым объектом для численного моделирования является конструкция замкового соединения керамических лопаток и металлического диска. На рисунке 9.59 представлена конструктивная схема, которая состоит из четырех частей.

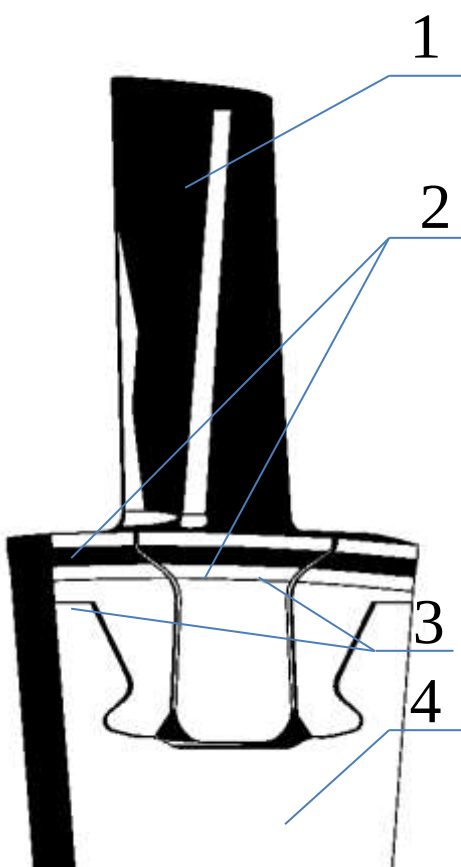


Рис.9.59. Конструкция в сборе. (1- лопатка турбины из композиционного материала, 2 – переходная пластина, 3 – переходная втулка, 4 – диск турбины).

Выбор конструктивной схемы замкового соединения керамических лопаток и металлического диска заключался в поиске типа соединения максимально удовлетворяющим эксплуатационным характеристикам. На основе анализа работ ведущих двигателестроительных фирм разработана модификация замкового соединения типа «ласточкин хвост» с посадкой в «елочный» замок. Материал



лопатки турбины – КМК-МС, переходной пластины – ЖС-6, Переходная втулка – ЖС-6, Диск турбины ЭП-99

Проведенный анализ теплофизических свойств материалов показывает, что материалы деталей конструкции имеют существенно различные значения термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Высокие эксплуатационные температуры обуславливают значительные термические деформации деталей. При этом большая разница в величине термического коэффициента линейного расширения используемых в конструкции материалов может приводить и приводит к возникновению значительных зазоров между смежными деталями или к возникновению в местах их контактирования значительных напряжений, вызванных температурной деформацией.

#### **9.2.2. Разработка расчетной модели лопатки типа «ласточкин хвост»**

Выбор конструктивной схемы замкового соединения керамических лопаток и металлического диска. На основе анализа работ ведущих двигателестроительных фирм разработана модификация замкового соединения типа «ласточкин хвост» с удлинённой ножкой лопатки для керамических лопаток.

Разработка параметризованной модели конструкции основывалась на работе, рис. 9.60 [25, 35], где параметрами служат геометрические размеры взятые из таблицы 1.

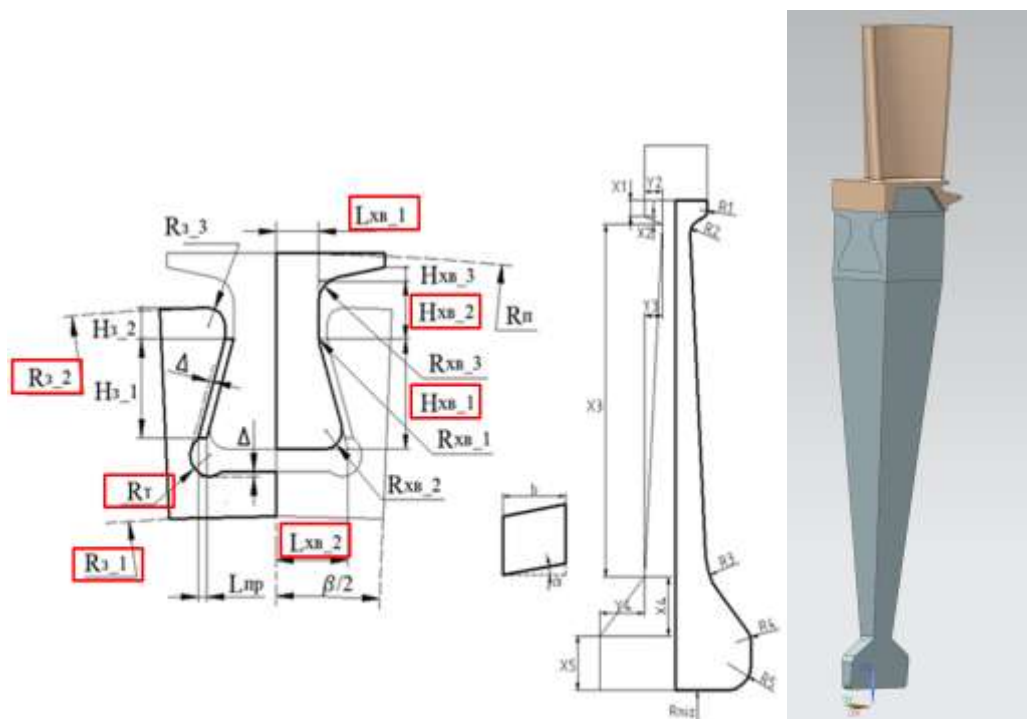


Рис.9.60. Модель рабочего колеса

Таблица 1 Оптимальные параметры замкового соединения

| Параметр     | $R_3\_1$ | $R_3\_2$ | $L_{xb\_1}$ | $L_{xb\_2}$ | $H_{xb\_1}$ | $H_{xb\_2}$ |
|--------------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Значение, мм | 262      | 287      | 4,5         | 9,7         | 15,1        | 8,6         |

### 9.2.3. Проектирование композитного материала

На сегодняшний день при разработке технологических систем и процессов все чаще используется методика инновационного проектирования. Это связано в первую очередь с тем, что идет рост функциональности CAD/CAE-инструментов, а также с их доступностью. Данные средства реализуют анализ изделия не через чертеж, а с помощью параметрической трехмерной модели, работу которой симулируют с помощью CAE-пакета.

По результатам проведенного анализа осуществляется оптимизация конструкции путем корректировки исходной CAD-модели. Поэтому при отработке виртуальной модели первый же созданный рабочий образец будет работоспособен и надежен.

Для проведения анализа детали из композитного материала было принято использовать расчетные блоки: Ansys Material Designer и Ansys ACP (Pre).

В модуле Material Designer выбирается тип объемного элемента модифицированной микроструктуры. В качестве такого элемента было выбрано однонаправленное волокно.

Также необходимо присвоить материал матрицы/наполнителя и частицы/волокон при создании геометрии объемного элемента (рис.9.61). В качестве матрицы был выбран Epoxy E-Glass UD, в качестве волокна Carbon Fiber.

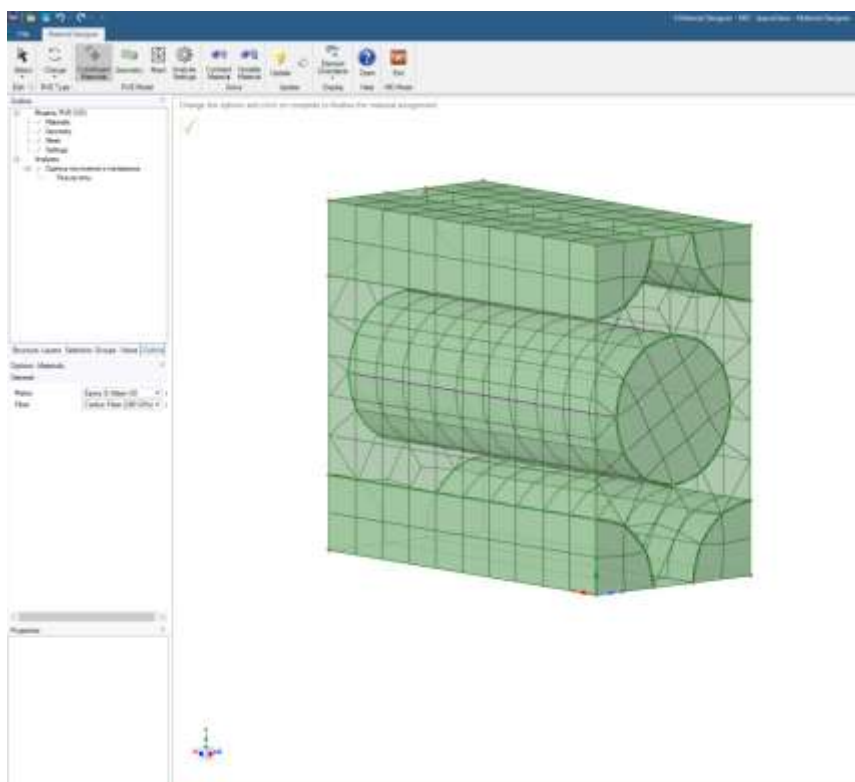


Рис.9.61. Создание геометрии объемного элемента

В настройках объемного элемента можно выставить интересные настройки анализа объемного элемента, где рассчитывается растяжение элемента, тепловое взаимодействие, а также анизотропия свойств (рис.9.62).

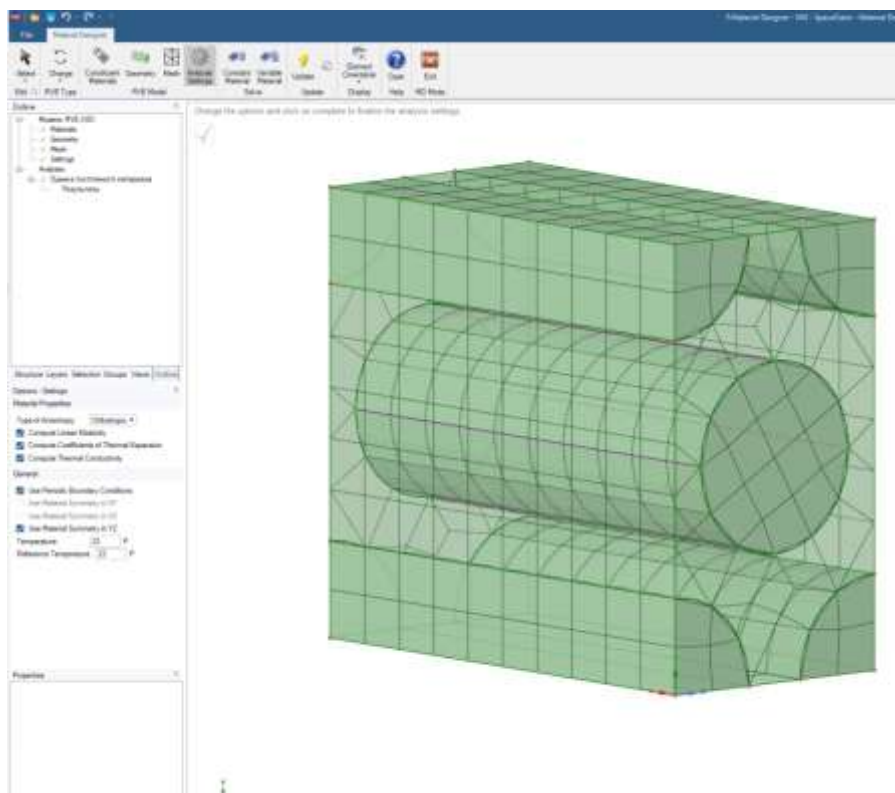


Рис.9.62. Выбор характеристик

Создаем связь между первым и вторым модулями Material Designer для присвоения созданного нами композитного материала к анализируемой геометрии через второй блок, рис. 9.64.

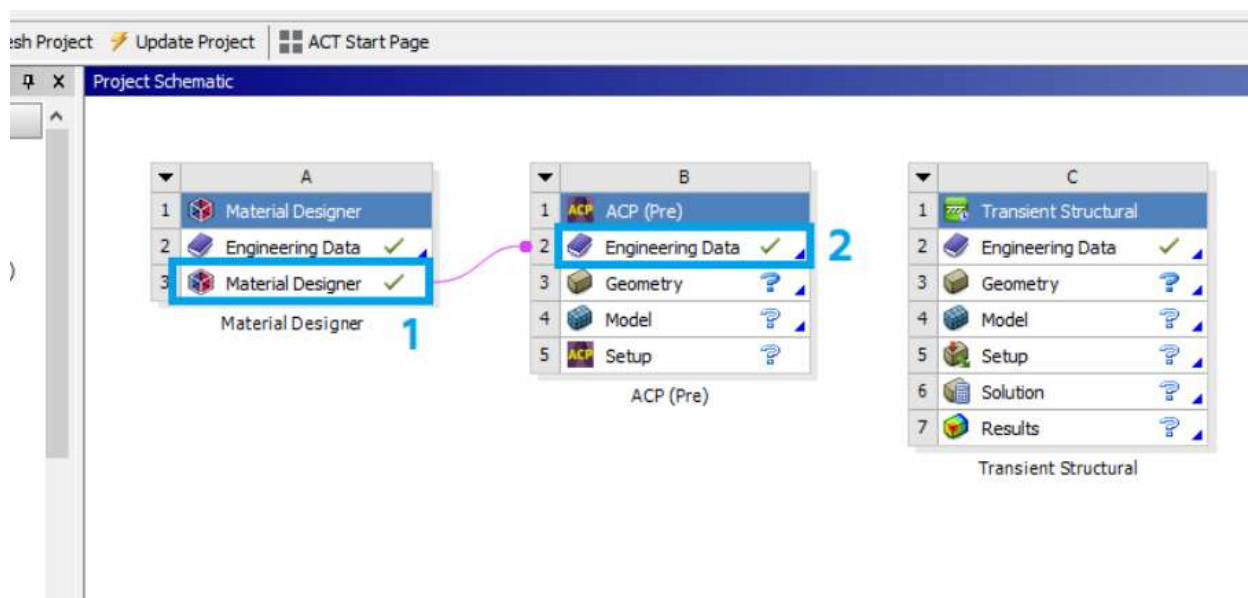


Рис.9.64. Создание связи

В качестве первого приближения исследуется задание структуры композитного материала, укладка волокон в теле замка лопатки. Основной особенностью работы модуля ACP (Pre) является то, что загружаемую геометрию

необходимо предоставить в виде оболочки/поверхности и потом задать толщину. Размеры сетки были выбраны исходя из нахождения идеального соотношения скорости и точности расчета.

Следующим шагом является настройка композитного материала.

Создаем слой волокон композитного материала (рис. 9.65):

– для этого необходимо в разделе Material Data создать «волокно», задать материал и толщину

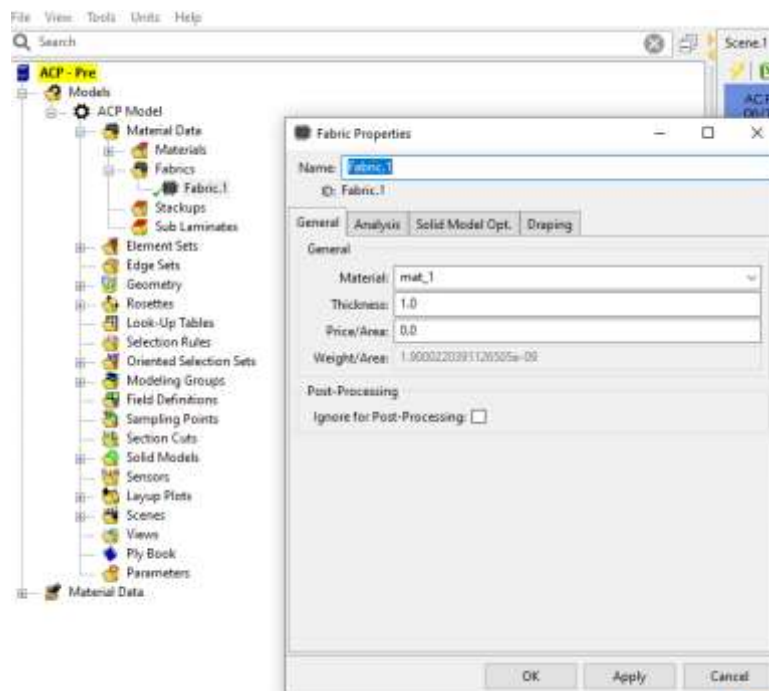


Рис. 9.65. Создание волокон

Для исследуемого образца необходимо создать ось координат и ориентированный блок, для задания направления укладки волокон.

Создаем ориентированный блок (рис. 9.66):

Выбрав элемент/геометрию (выбираем его в дереве построения в разделе Element Sets), настраиваем ориентацию, выбираем созданную ось координат.

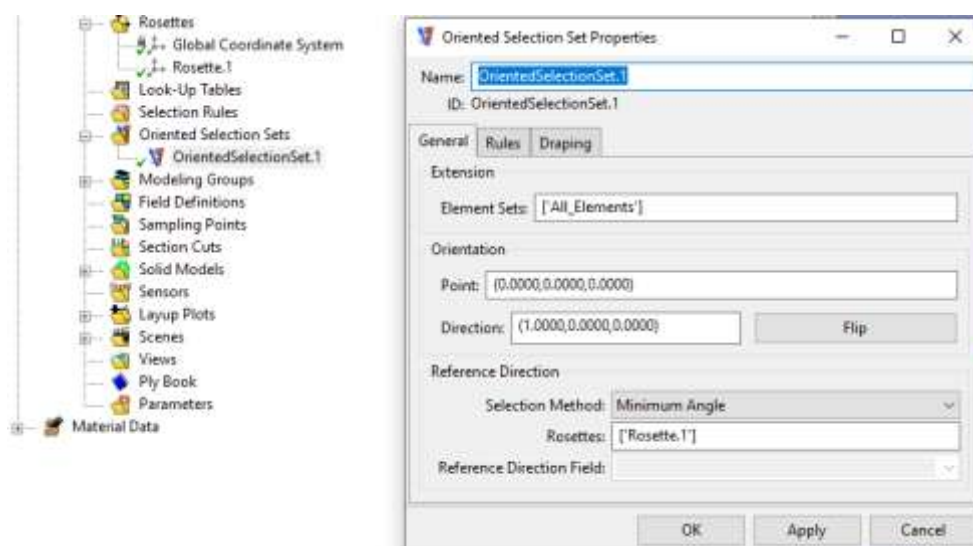


Рис.9.66. Создание ориентированного блока

Также необходимо создать модельную группу (объединение ориентированного элемента и укладки) (Рис.9.67):

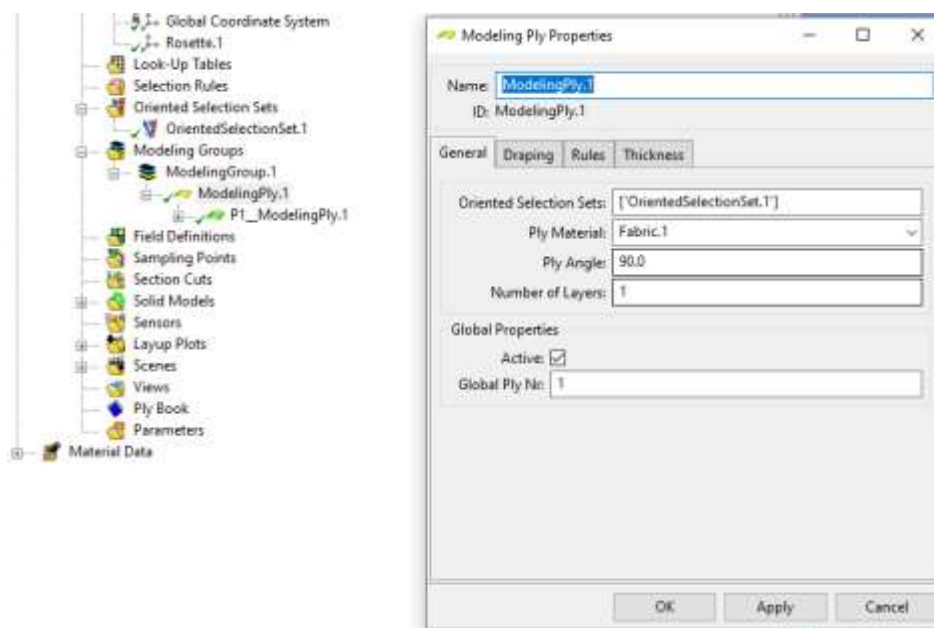


Рис.9.67 Создание модельной группы

Включив отображение сетки и направление волокон в верхней панели (Рис.9.68) и выбрав модельную группу, видим зеленые стрелочки, показывающие направление волокон.

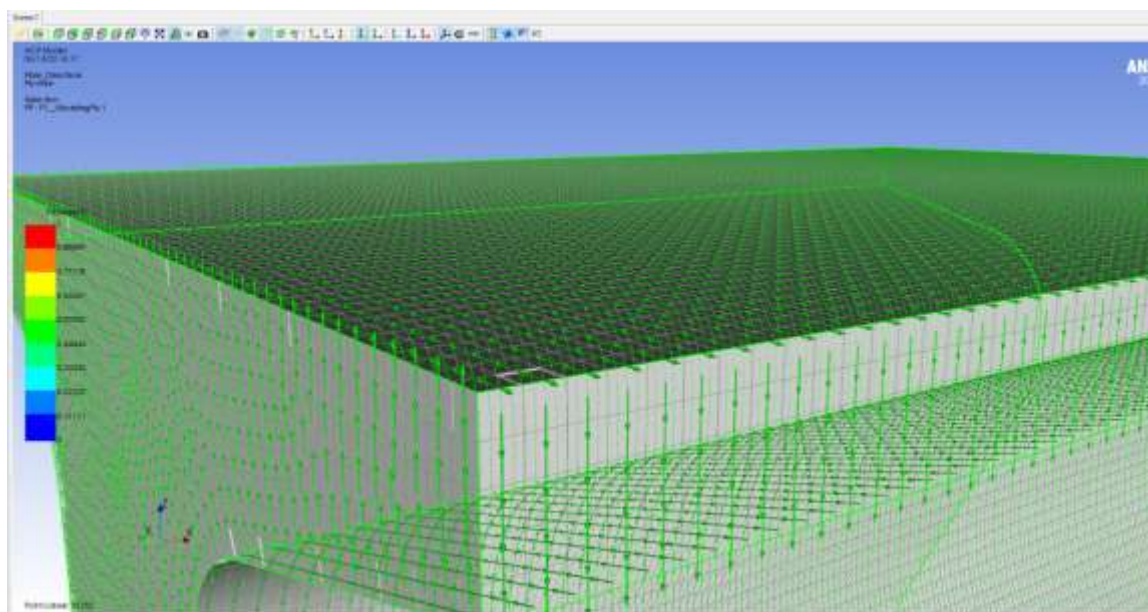


Рис.9.68 Отображение направления волокон

### ***Тепло-прочностной расчет.***

Для решения задачи определения полей температуры и давления в конструктивном элементе построена его твердотельная геометрическая модель.

В связи с тем, что основной процесс контактного теплообмена происходит в местах крепления, а также, то, что геометрическая модель представляет собой осесимметричную конструкцию, для снижения требования к вычислительным ресурсам и времени выполнения теплового и механического анализа, в расчетах были приняты следующие допущения:

- в расчетную область помещается только один КПЭ;

На Рис.9.69 представлена геометрическая модель после ее преобразования с учетом сделанных допущений. Предварительный расчет теплового и механического состояния конструкции был выполнен по представленной модели.

Операции по построению трехмерной модели выполнялись в программном комплексе твердотельного проектирования **SiemensNX**. На границах сектора были установлены граничные условия периодичности геометрии – ***Periodic Region***, с заданным углом сектора и количеством повторений.





Рис.9.69 Объемная геометрическая модель

Программной средой, позволяющей проводить детальный анализ теплового и напряженно-деформированного состояния конструкции при нагреве, является среда междисциплинарного конечно-элементного анализа **ANSYS Multiphysics**. Выбор данной программной среды обусловлен возможностью использовать при выполнении сопряженного анализа тепловой и прочностной задачи единственную конечно-элементную модель, с соответствующим набором параметров. Подобный подход позволяет значительно упростить моделирование междисциплинарной задачи. Выполнение анализа в среде **ANSYS Multiphysics** позволило выполнить широкий спектр задач междисциплинарного взаимодействия (создание модели, решение и последующая обработка результатов) используя единственную расчетную модель.

Результат генерации конечно-элементной сеточной модели представлен на рис. 9.70.



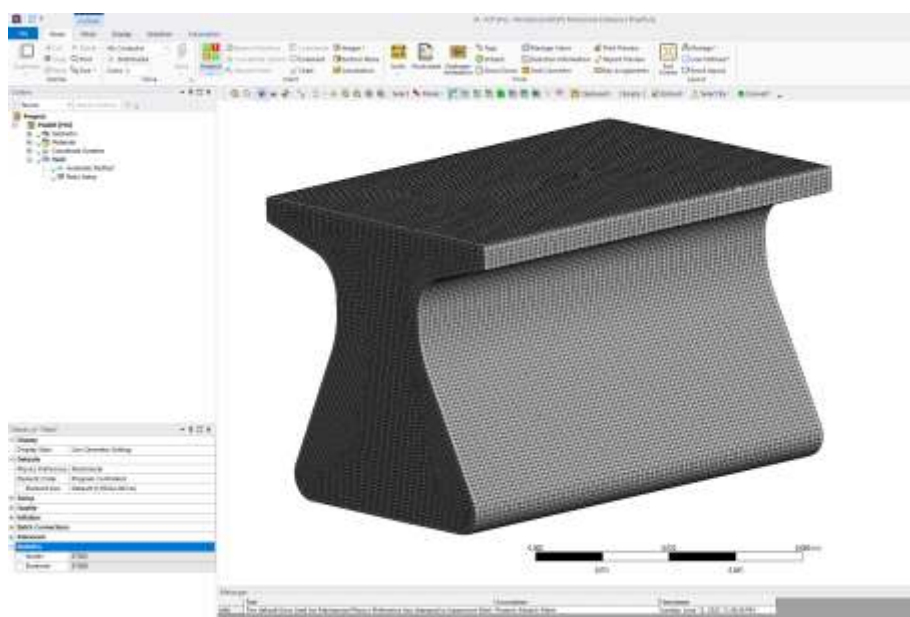


Рис.9.70 Конечно-элементная модель для расчета.

В качестве граничных условий Рис.9.71. задаются сила и условия заделки.

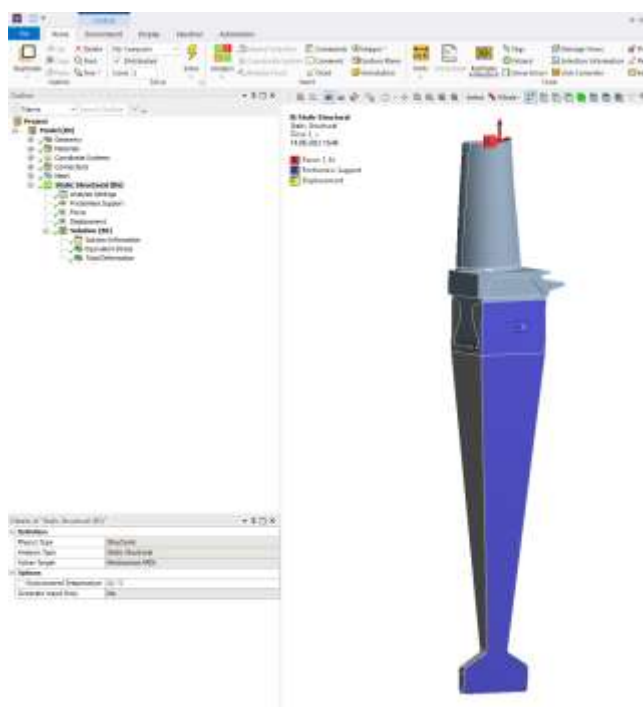


Рис.9.71 Задание граничных условий

По результатам проведенного термо-прочностного анализа видно (Рис.9.72.), что в ступенчатом узле стыковки композитной камеры сгорания и переходной головки происходит неравномерное расширение деталей, обусловленное различными значениями ТКЛР материалов деталей.

B Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Units: mm  
Time: 1  
14.06.2022 18:48

2.0325e-9 Max  
1.8111e-9  
1.5847e-9  
1.3583e-9  
1.132e-9  
8.0556e-10  
6.7917e-10  
4.5278e-10  
2.2629e-10  
0 Min



Рис.9.72 Перемещения лопатки

B Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von Mises) Stress  
Units: Pa  
Time: 1  
14.06.2022 16:58

2921.7 Max  
2597.1  
2272.5  
1947.8  
1623.2  
1298.6  
973.94  
649.3  
324.67  
0.039323 Min

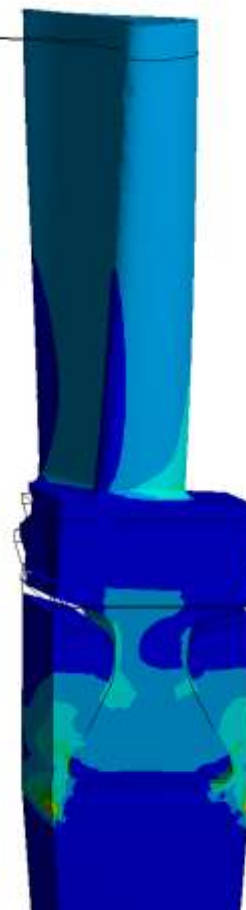


Рис.9.73 Напряженное состояние узла

5.8845e7 Max  
5.5104e7  
5.1467e7  
4.7827e7  
4.4187e7  
4.0547e7  
3.6907e7  
3.3267e7  
2.9627e7  
2.5987e7  
2.2347e7  
1.8707e7  
1.5067e7  
1.1427e7  
7.787e6  
4.147e6  
5 Min

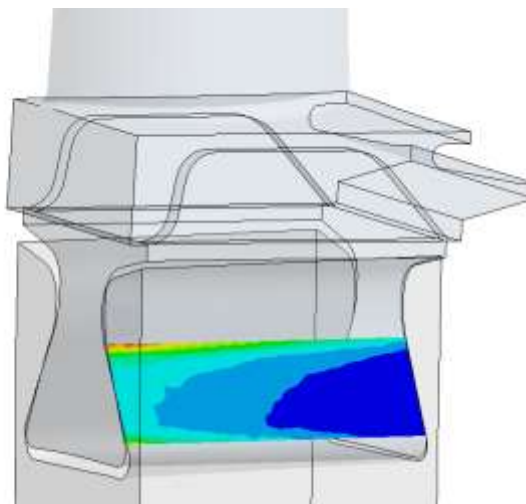


Рис.9.74 Напряжения в зоне контакта хвостовой части лопатки

В ходе расчета было получено, что лопатка под воздействием силы проворачивается и вытягивается. В расчетном блоке Ansys ACP (Pre) определена геометрия хвостовой части лопатки из композитного материала. Из-за

особенности работы расчетного блока только с тонкостенными изделиями было принято второе допущение: исследуются три основных зоны контакта в хвостовике лопатки: А, В, С (Рис.9.75).

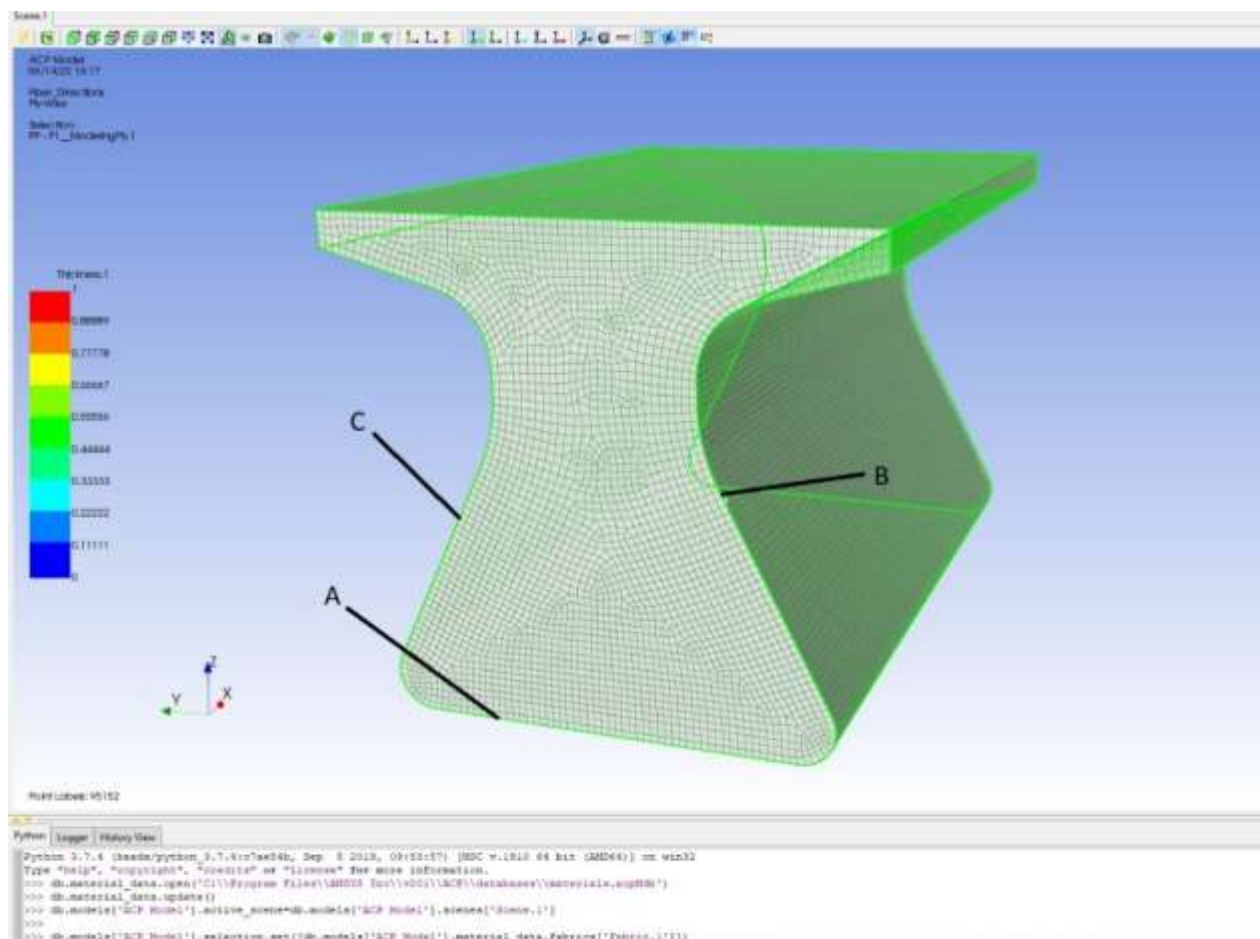


Рис.9.75 Выбор зон контакта

Зоны были выбраны исходя из прочностного анализа лопатки и диска турбины.

### 9.2.3. Создание макета цифрового двойника контактирующих поверхностей

С целью определения мест контакта натуральных соединений и получения сведений по состоянию поверхностей модельных элементов необходимо выполнить съем профилограммы. Результаты полученной профилограммы импортируются в Excel файл, в котором можно наглядно увидеть

микрогеометрию поверхности, а также координаты микровыступов и микровпадин.

Трехмерные модели поверхностных микронеровностей можно получить, смоделировав геометрию поверхности, используя данные полученные с цифрового профилометра, Рис.9.76-77

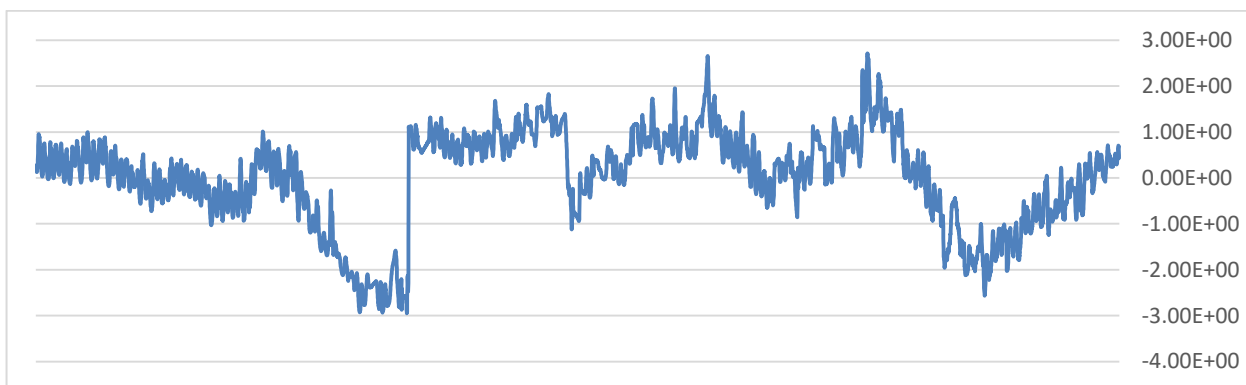


Рис.9.76 Профилограмма ЖС-6

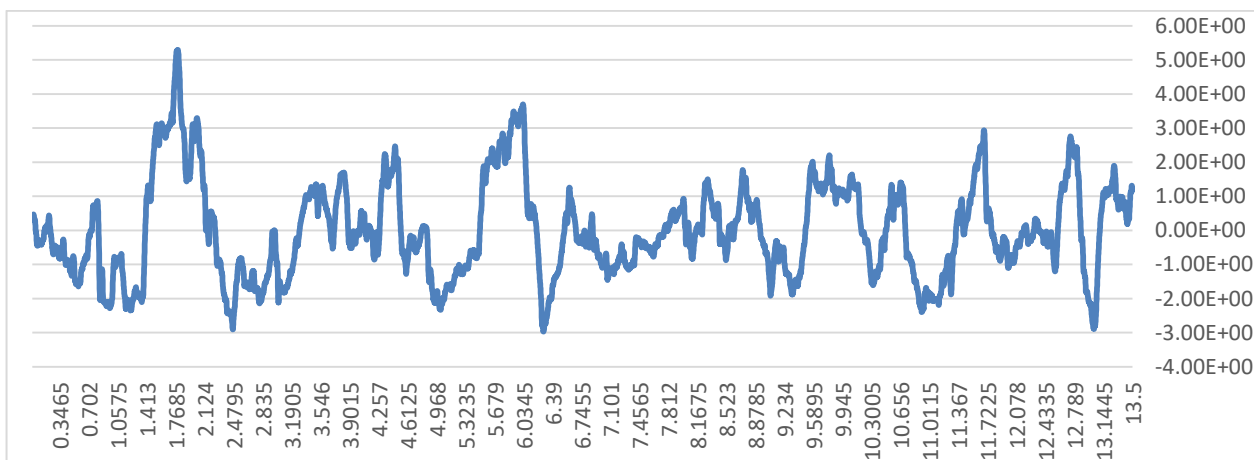


Рис.9.77 Профилограмма КМК-МС

Базовая длина для моделирования – длина поверхности на которой будут моделироваться профилограммы  $L=3\text{мм}$ . Для контактной задачи моделировалась две поверхности: КМК-МС с  $Ra=2,07$  (Рис.9.78) и вторая поверхность ЖС-6 с  $Ra = 0,82$ . которая в дальнейшем помещалась в сборку и сближались относительно поверхностей контакта до интервала  $0.31\text{ мм}$  рис.9.79.

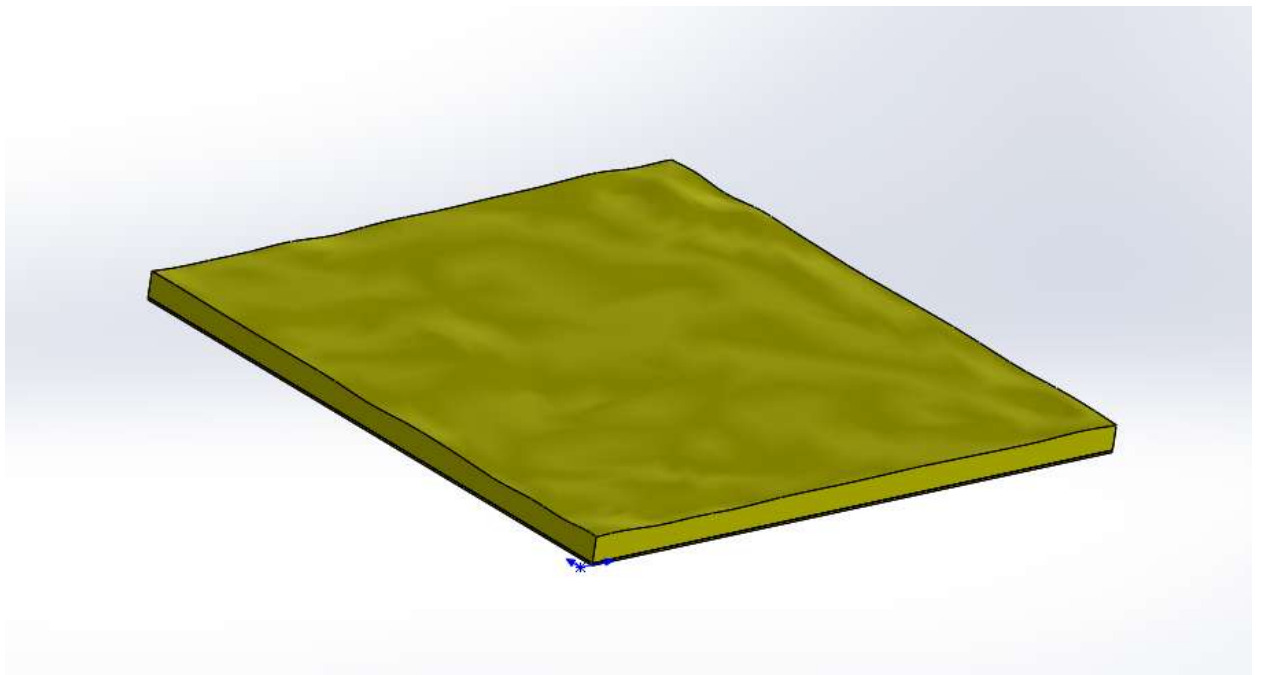


Рис.9.78 Сmodelированная поверхность КМК-МС  $Ra=2,07$

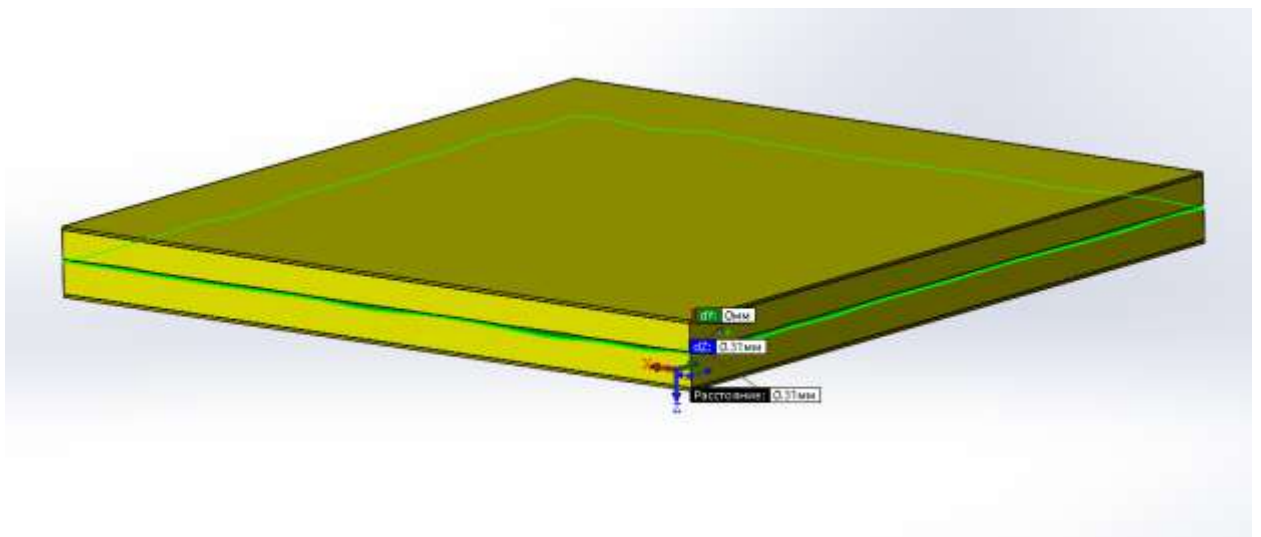


Рис.9.79 1 Сближение образцов в контактной области

Таким образом в результате работы программы моделирования шероховатой поверхности получается контактная пара двух шероховатых поверхностей. Полученная трёхмерная криволинейная поверхность в дальнейшем используется в программном комплексе ANSYS Mechanical для изучения контактного теплообмена материалов с приложением различных нагрузок.

#### 9.2.4. Моделирование укладки волокон в конструкции узла контакта лопатка-диск газотурбинного двигателя

##### Зона А:

С помощью модуля Ansys ACP (PRE) реализовано направление армирующих волокон. В данном случае по технологии создания композитной лопатки необходимо, чтобы в зоне А первый слой создавал условный «каркас» замкового соединения, толщина волокна 0,5 мм, рис. 9.80.

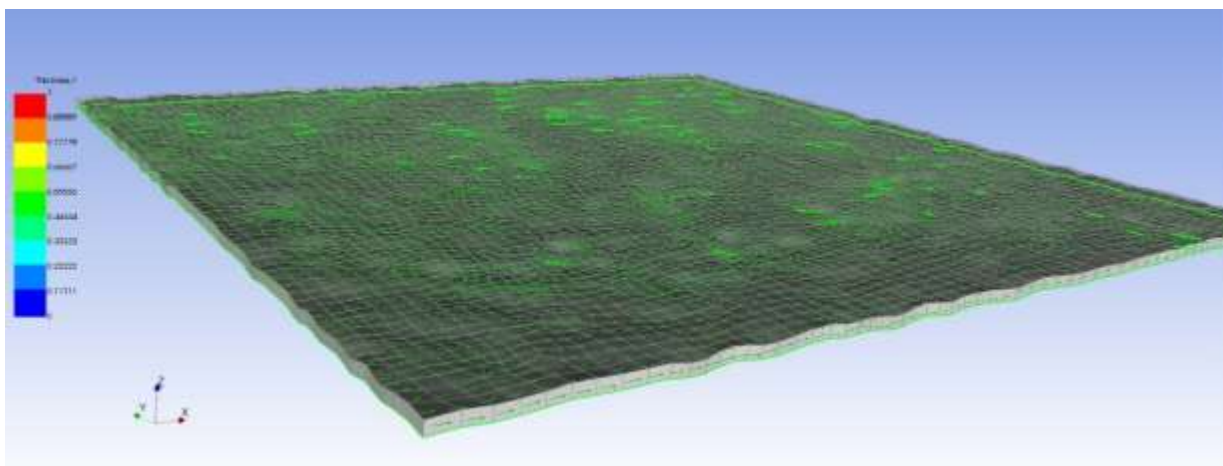


Рис.9.80 Моделирование контактной зоны А

##### Зона В

Здесь укладка произведена по контуру тела замкового соединения и составляет 60 градусов (рис.9.81).

Также могут быть рассмотрены укладка волокон под  $[0]$ ,  $[90]$  и  $[30]$ . Укладка волокон под  $[45]$  в хвостовой части лопатки в данной зоне не является оптимальной поскольку волокно не формирует необходимой прочности каркаса лопатки.

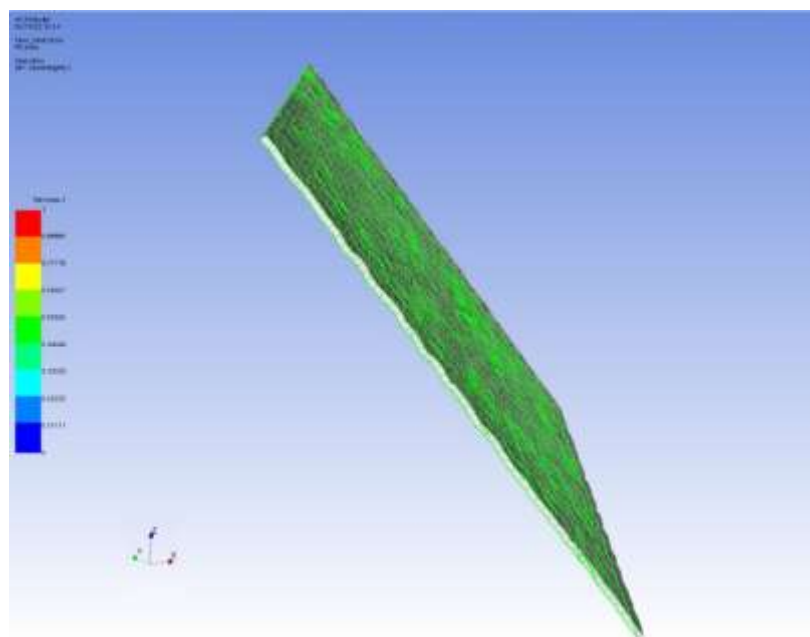


Рис.9.81 Моделирование контактной зоны В

### Зона С

Создана так же, как и зона В. Укладка произведена по контуру тела замкового соединения и составляет [60], рис. 37.

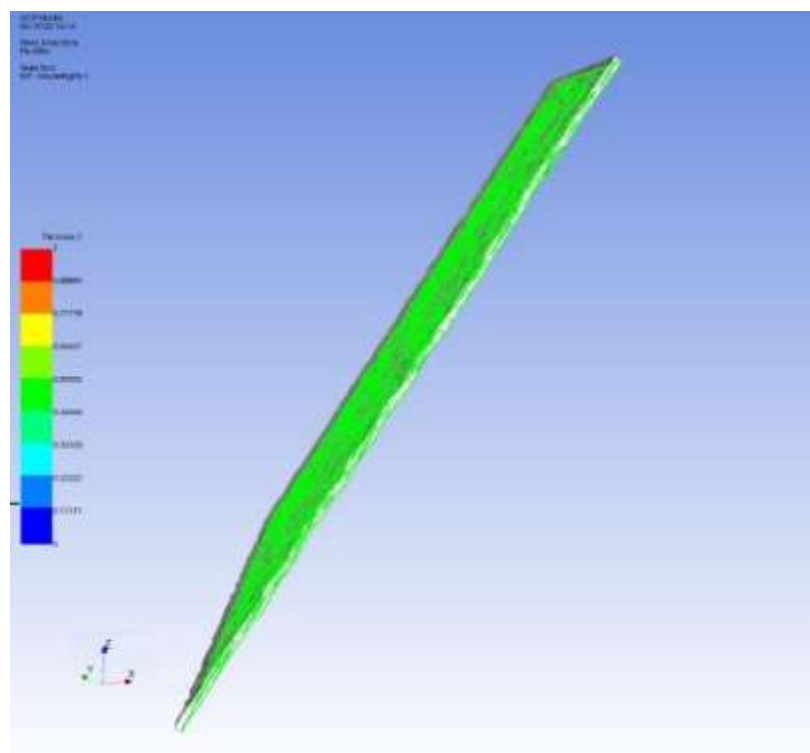


Рис.9.82 Моделирование контактной зоны С

Необходимо задать контактную область - это модель контакта 2 материалов, рис.9.83.



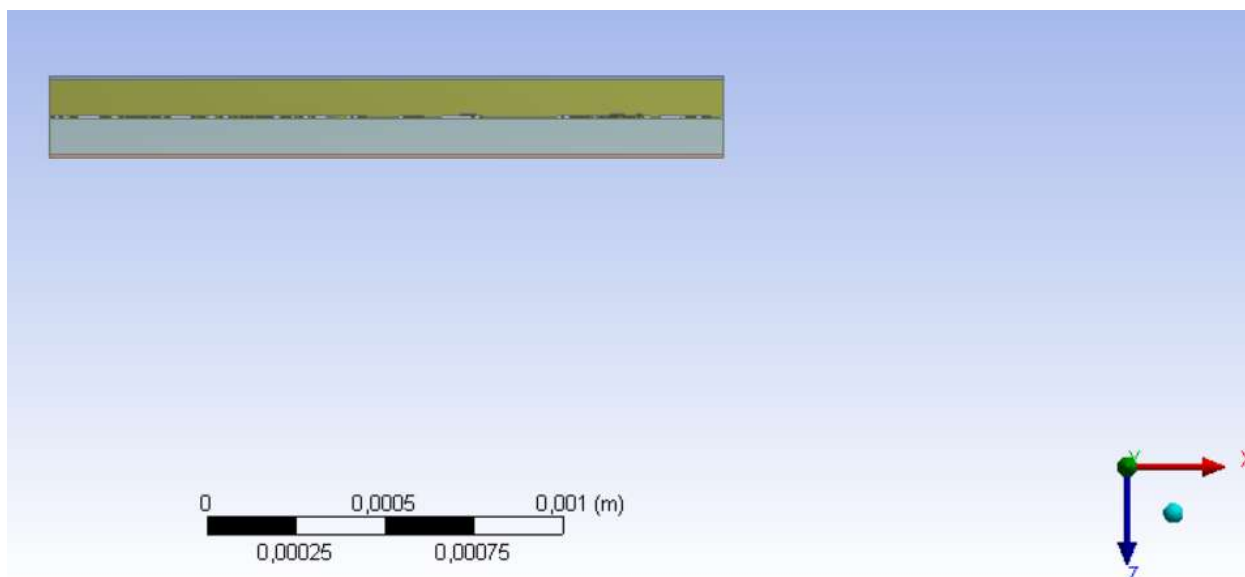


Рис.9.83 Контактная область

Загрузим модели в блок Static Structural для определения величины смещения, деформации и напряжения. Когда модель импортирована контакты можно определить автоматически и задать программой, но необходима настройка нескольких параметров, которые сделают расчет более точным.

В первую очередь необходимо выбрать тип контакта. От типа контакта зависит задача, которую необходимо решить. Для верхней и нижней пластины с помощью, которой будет определяться дальнейшее перемещение необходимо установить Bonded – скольжение и разделение между гранями не допускается. Площадь контакта не меняется во время приложения нагрузки.

Тип контакта Frictionless следует установить непосредственно для исследуемых поверхностей. Предполагается нулевой коэффициент трения.

Необходимо установить условие поведения контакта симметричный или асимметричный. Поскольку в контактной области, одна поверхность проявляет свойства контактной (жесткая), а другая свойства целевой поверхности (пластичная), то следует поставить Behavior – Asymmetric. Formulation выбираем по определению Лагранжа, это увеличит время расчетов, но точность будет выше, что намного важнее, обновление результатов должно проходить каждую итерацию расчета, чтобы поймать момент контакта.

Следующим важным параметром является Radius Pinball – оценивает расстояние между контактом и поверхностью. Любая область между



поверхностями, которая касается или лежит в пределах радиуса пинбола, считается находящейся в контакте. Управлять областью контакта можно либо радиусом пинбола - самостоятельно, либо с помощью параметра tolerance value, который определяет, что поверхность, попавшая в данный диапазон, находится в контакте. Параметром возможно управлять в зависимости от того насколько точно требуется найти контакт. Следующий важный параметра – это Adjust to touch или настроить на касание. Данная функция удалит зазор и численно предположит, что поверхности соприкасаются друг с другом. Настройки представлены на рисунке 9.84.

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| <b>Scope</b>                  |                           |
| Scoping Method                | Geometry Selection        |
| Contact                       | 1 Face                    |
| Target                        | 1 Face                    |
| Contact Bodies                | Ra= 2.07 S= 35.56 L= 2.00 |
| Target Bodies                 | Ra= 0.82 S= 10.69 L= 2.00 |
| Protected                     | No                        |
| <b>Definition</b>             |                           |
| Type                          | Frictionless              |
| Scope Mode                    | Automatic                 |
| Behavior                      | Asymmetric                |
| Trim Contact                  | Off                       |
| Suppressed                    | No                        |
| <b>Advanced</b>               |                           |
| Formulation                   | Augmented Lagrange        |
| Small Sliding                 | Program Controlled        |
| Detection Method              | Program Controlled        |
| Penetration Tolerance         | Program Controlled        |
| Normal Stiffness              | Program Controlled        |
| Update Stiffness              | Program Controlled        |
| Stabilization Damping Factor  | 0,                        |
| Pinball Region                | Program Controlled        |
| Time Step Controls            | None                      |
| <b>Geometric Modification</b> |                           |
| Interface Treatment           | Adjust to Touch           |
| Contact Geometry Correction   | None                      |
| Target Geometry Correction    | None                      |

Рис.9.84 Настройка контакта

Для точности результатов необходимы грамотные настройки сеточной модели, недостатки сетки очень сильно влияют на результаты расчета. Размеры сетки были выбраны исходя из нахождения идеального соотношения скорости и точности расчета. Наибольший интерес представляет область контакта.

Использована функция сгущения сетки по контактируемым граням с 3 слоями, что позволяет более точно описать поведение контакта, рис.9.85.

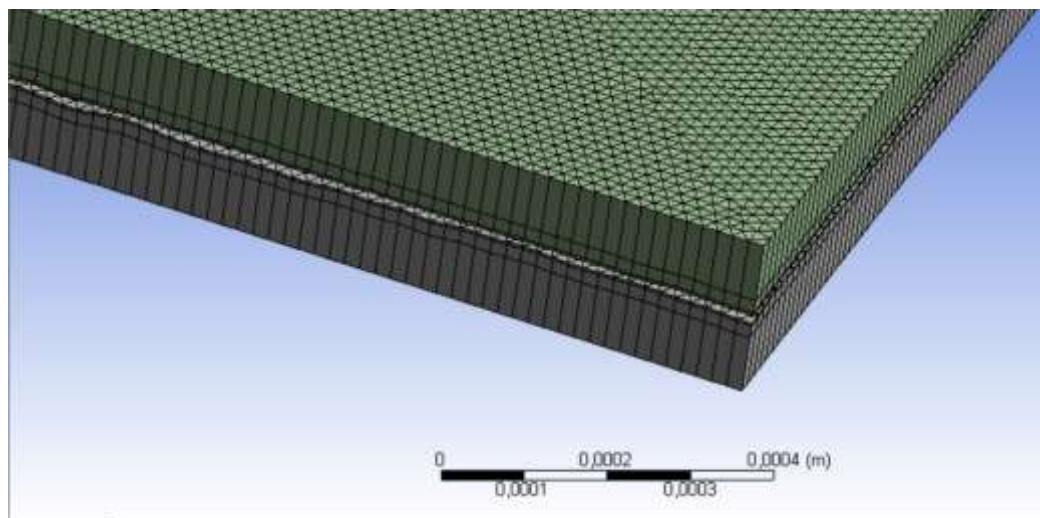


Рис.9.85 Сгенерированная сеточная модель

Сетка построена с помощью sweep-метода с треугольными элементами. Количество элементов сетки - 123876 , количество узлов – 396547.

#### **9.2.5. Численное моделирование механического контакта лопатка-диск на микроуровне**

Для всех зон необходимо пересчитать величину смещения в зависимости от приложенных сил, для зон В и С это является особенно важным.

После передачи сеточной модели в модуль расчета для нее были заданы граничные условия (рис.9.86) следующего типа:

- Нагрузка А: к верхней границе приложено давление  $P$ , которое изменяется в диапазоне от 0,1 до 10 атм.
- Нагрузка В: к боковым границам образцов приложены граничные условия скользящей заделки без трения
- Нагрузка С: к нижней границе приложено граничное условие жесткой заделки

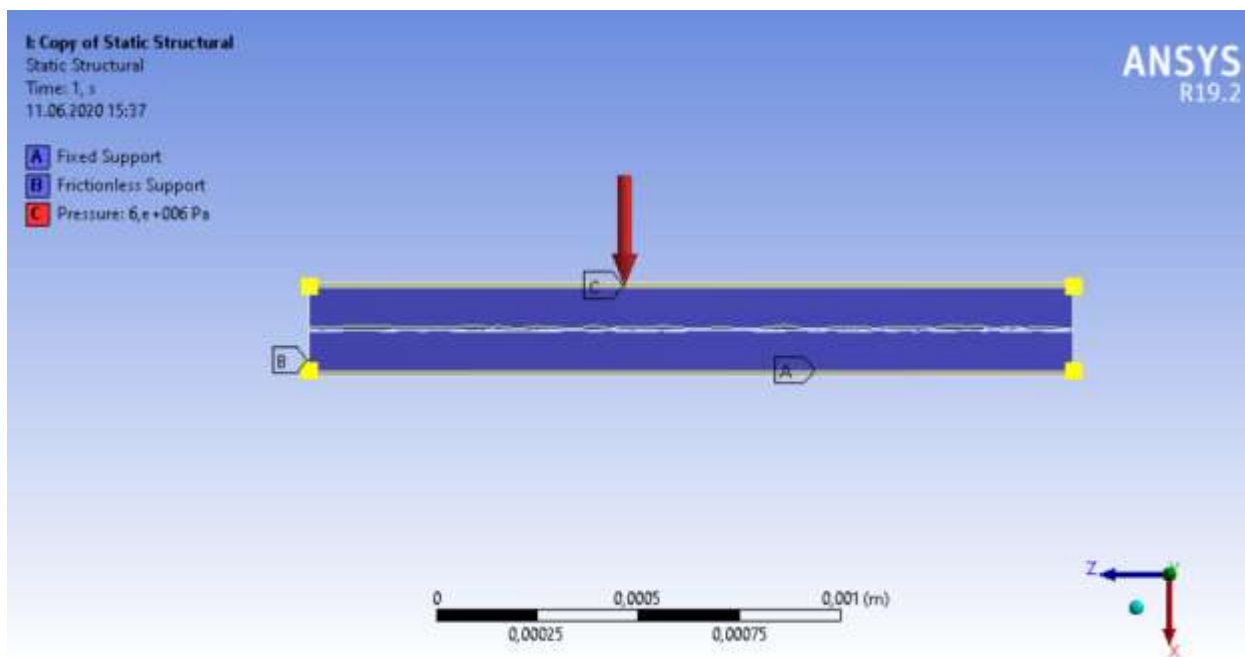


Рис.9.86 Установка граничных условий

Программный комплекс мультидисциплинарного анализа ANSYS позволяет рассчитывать и визуализировать деформации и напряжения различных видов. Результаты расчеты представлены на рис.9.87-89.

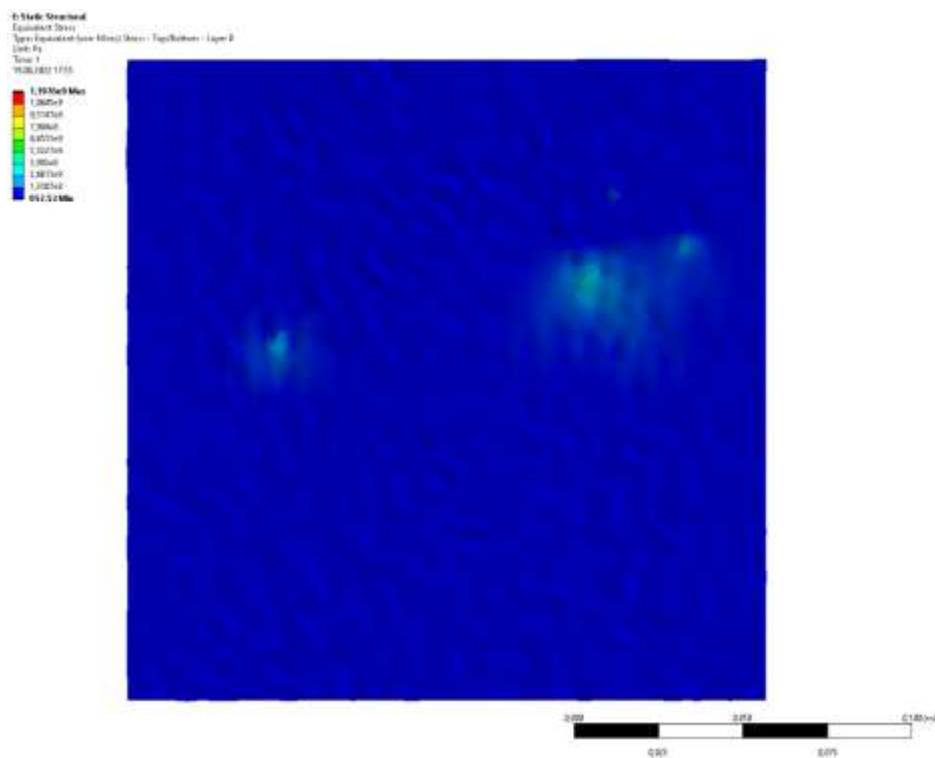


Рис.9.87 Поле эквивалентных напряжений при  $P = 10000$  Па

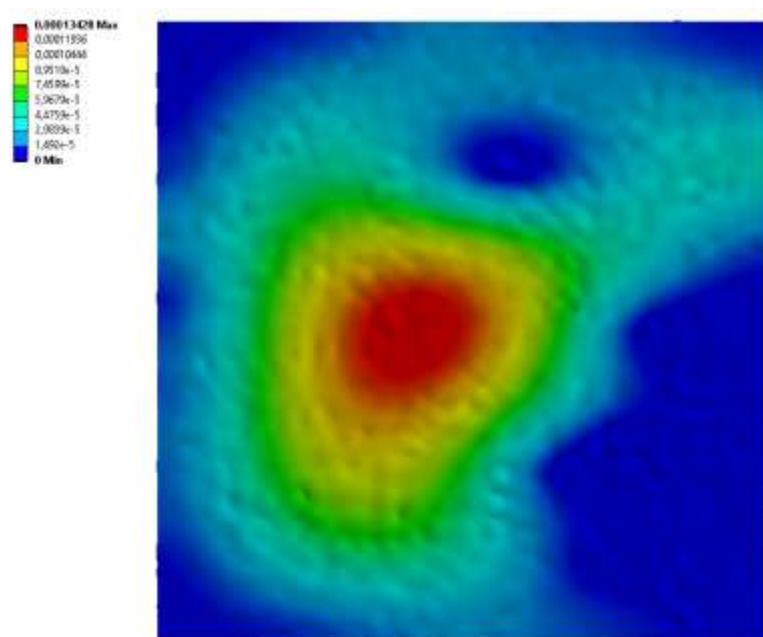


Рис.9.88 Поле деформаций при  $P = 10000$  Па

Рис.9.89

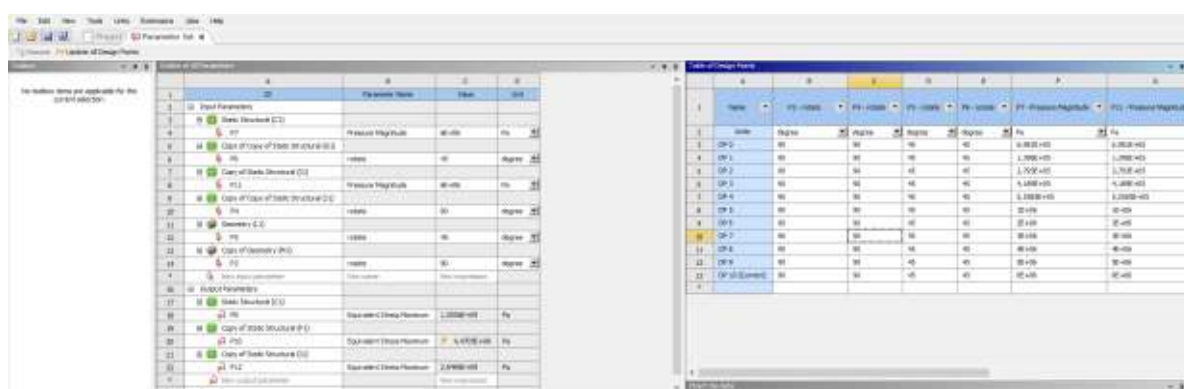


Рис.9.90 Реализация расчета в среде Ansys для различных давлений

Для каждого значения давлений рассчитаны значения перемещения координаты верхней плоскости для нахождения величины проникновения поверхности детали в поверхность другой детали.

В зависимости от угла армирования были получены следующие величины смещений (рис.9.91, таблицы 3-6):

## Зона А



Рис.9.91 Величина смещение поверхности при угле армирования [90]

Таблица 3 Величина смещение поверхности при угле армирования [90]

| Угол | Давление, МПа | Смещение, м |
|------|---------------|-------------|
| 90   | 0,1           | 1,066E-05   |
|      | 0,3           | 2,125E-05   |
|      | 0,4           | 2,223E-05   |
|      | 0,5           | 2,323E-05   |
|      | 0,7           | 2,632E-05   |
|      | 1             | 2,927E-05   |
|      | 2             | 3,124E-05   |
|      | 3             | 3,330E-05   |
|      | 4             | 3,531E-05   |
|      | 5             | 3,778E-05   |
|      | 6             | 3,952E-05   |
|      | 7             | 4,100E-05   |
|      | 8             | 4,489E-05   |
|      | 9             | 4,761E-05   |
|      | 10            | 5,266E-05   |

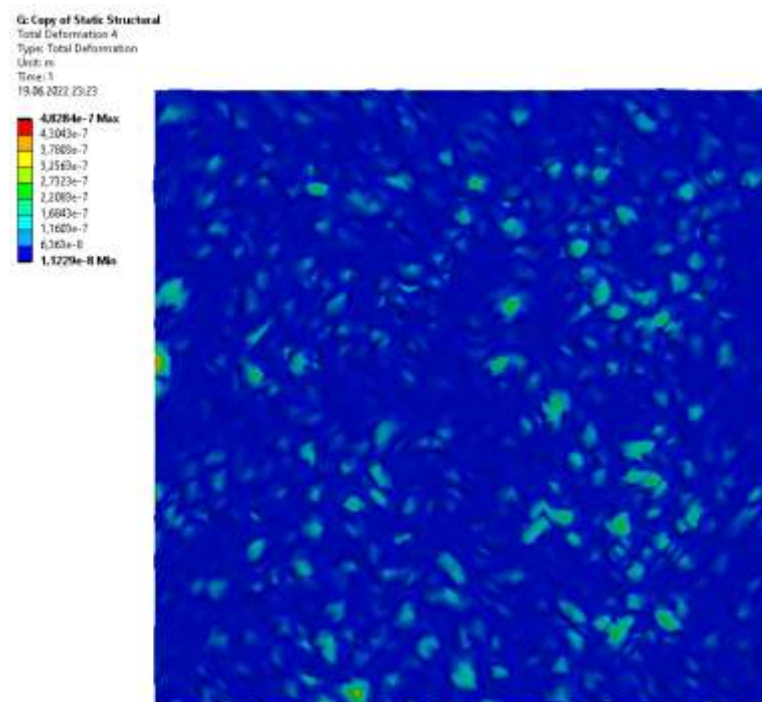


Рис.9.92 Величина перемещения поверхности при угле армирования [90]



Рис.9.93 Величина смещение поверхности при угле армирования [0]+[90]

Таблица 4. Величина смещение поверхности  
при угле армирования [0]+[90]

| Угол     | Давление,<br>МПа | Смещение, м |
|----------|------------------|-------------|
| [0]+[90] | 0,1              | 1,01E-07    |
|          | 0,3              | 1,05E-07    |
|          | 0,4              | 1,11E-07    |
|          | 0,5              | 1,27E-07    |
|          | 0,7              | 1,51E-07    |
|          | 1                | 1,63E-07    |
|          | 2                | 1,80E-07    |
|          | 3                | 1,97E-07    |
|          | 4                | 2,05E-07    |
|          | 5                | 2,11E-07    |
|          | 6                | 2,17E-07    |
|          | 7                | 2,27E-07    |
|          | 8                | 2,36E-07    |
|          | 9                | 2,51E-07    |
|          | 10               | 2,59E-07    |

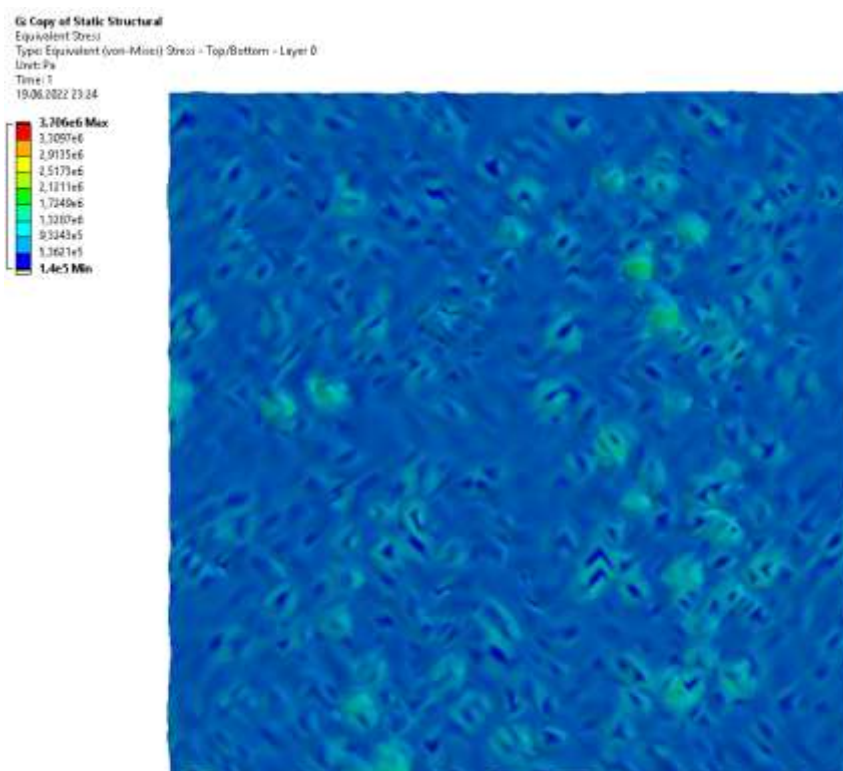


Рис.9.94 Величина перемещений поверхности при угле армирования [90]



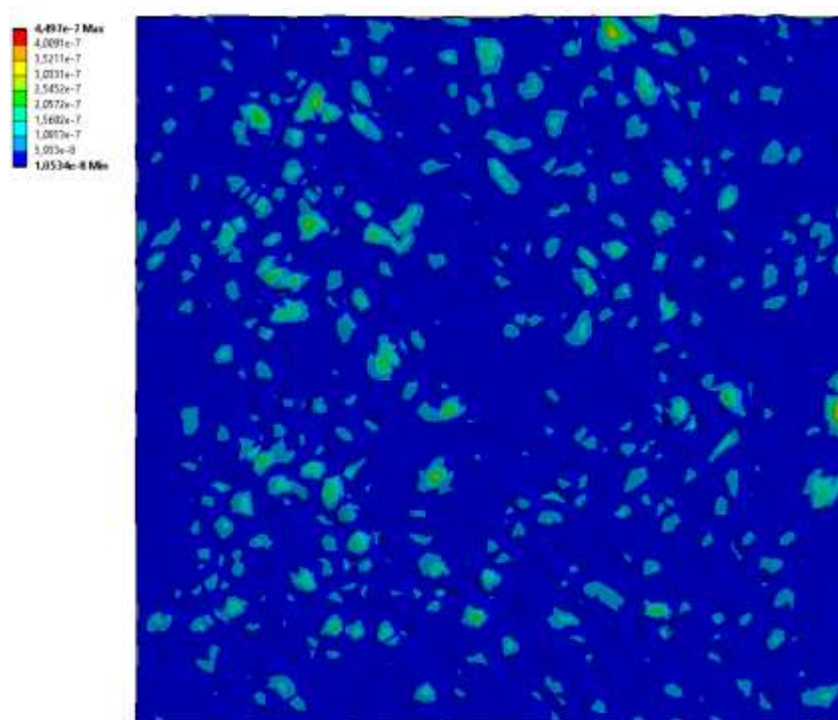


Рис.9.95 Величина перемещений поверхности при угле армирования [30]+[90]

Основной проблемой при расчетах конструкций является недопущение их разрушения, поэтому особое внимание приобретает проблема длительной прочности металлов, из которых изготовлены конструкции. Поэтому на рисунке 9.96 представлена зависимость эквивалентного напряжения от давления.

На рисунке 9.97 представлен график для сравнения зависимости смещения от приложенного давления с учетом углов армирования композитного материала. Как видно из общего графика зависимости величины смещения от приложенного давления - наименьшее смещение соответствует углу армирования равному [0]+[90].



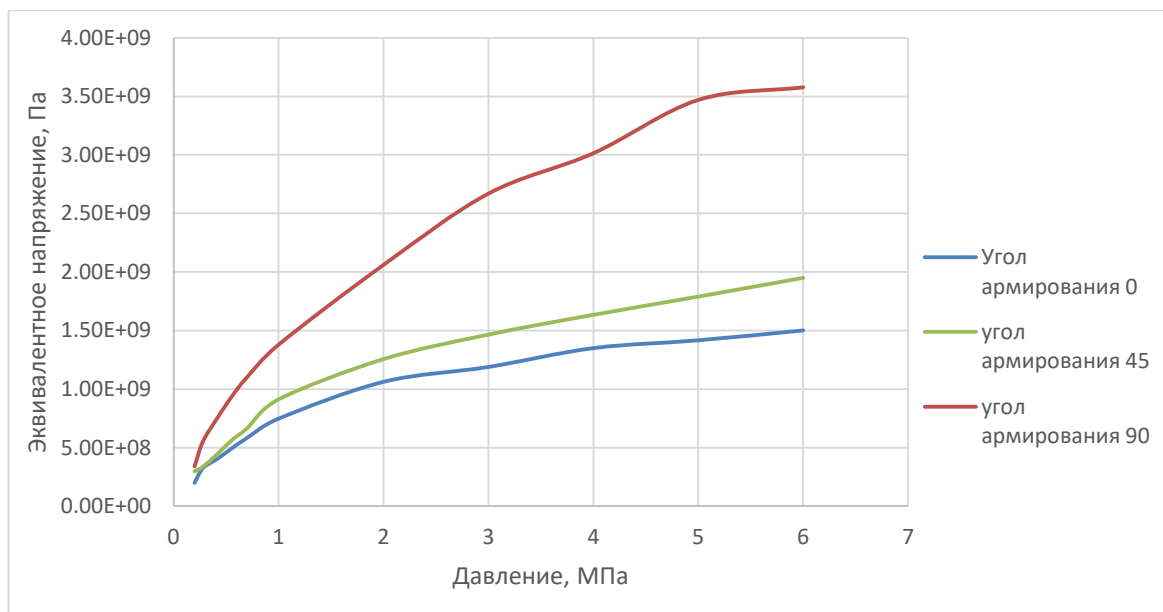


Рис.9.96 Зависимость напряжения от приложенного давления в сравнении для 3-х углов армирования

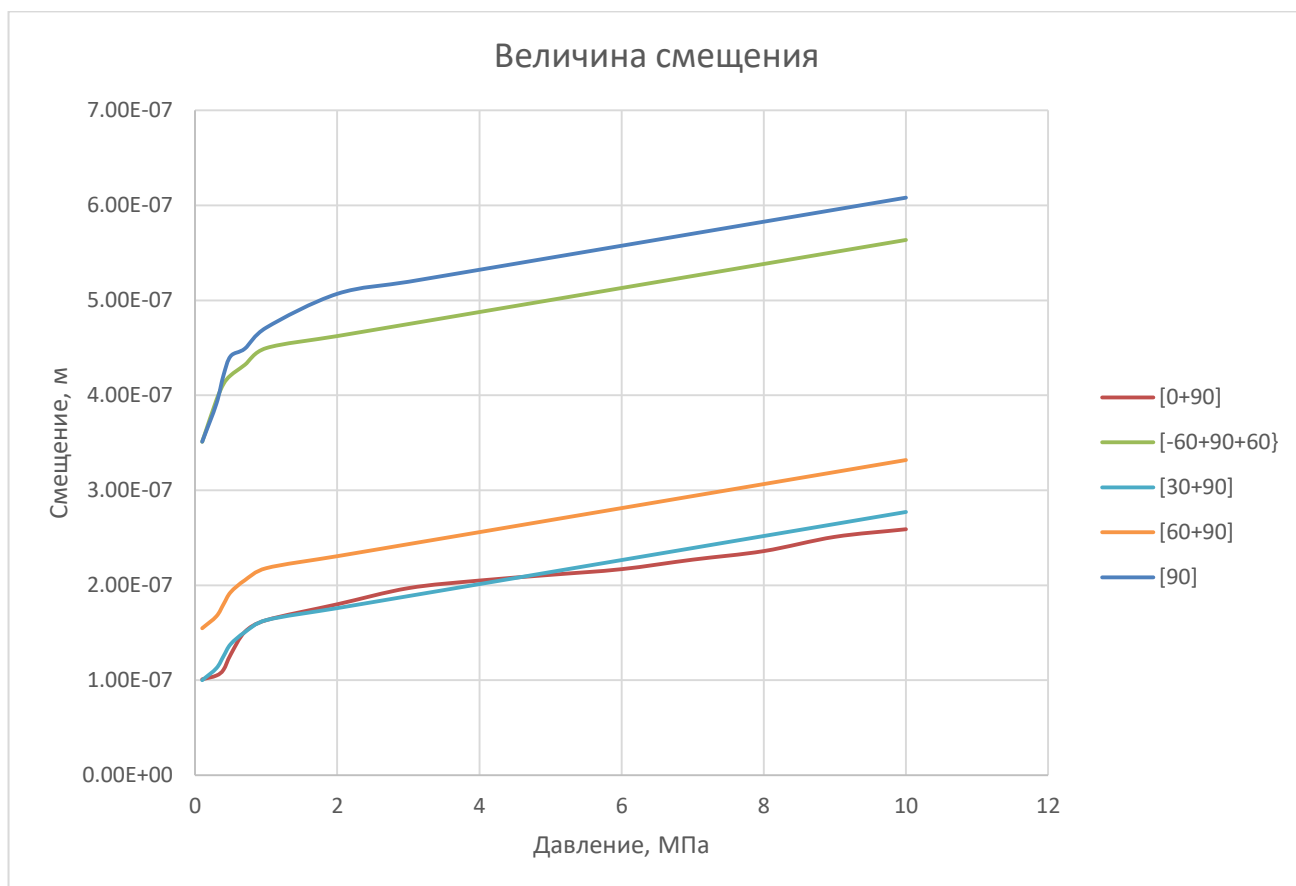


Рис.9.97 Величина смещения поверхностей при разных углах армирования волокон

Эквивалентное напряжение ( $\sigma$ ) – это напряжение, под действием которого материал в условиях простого растяжения-сжатия оказывается в равноопасном состоянии с рассматриваемым сложным напряженным состоянием.

Согласно первой теории прочности опасное состояние материала при сложном напряженном состоянии наступает тогда, когда наибольшее по модулю главное напряжений достигает предельного значения для заданного материала при простом растяжении (сжатии).

На этом шаге первый под этап моделирования заканчивается. Получено среднее значение смещения поверхности в зависимости от давления, что необходимо на следующем этапе – моделировании контактного теплообмена.

#### **9.2.6. Численное моделирование теплового контакта лопатка-диск на микроуровне**

Для определения КТС создается трехмерная модель, которая описывает реальную поверхность с учетом ее микрогеометрии. Моделирование по всему объему конструкции потребует больших компьютерных мощностей для расчета, поэтому воспользуемся допущением, что контакт имеет одинаковый характер по всему радиусу контакта. Это позволит взять в качестве модели настолько маленький объем контактирующих поверхностей, что они примут вид двух пластин, которые показаны на рис. выше.

На предыдущем шаге были получены значения давлений при контакте и величина смещения. Воспользовавшись полученными данными, возможно смоделировать давление для увеличения фактической площади контакта, рисунки 9.98-99. Такой метод позволит не нагружать модель прочностной задачей, что значительно сократит время расчета, что для большого количества моделей.

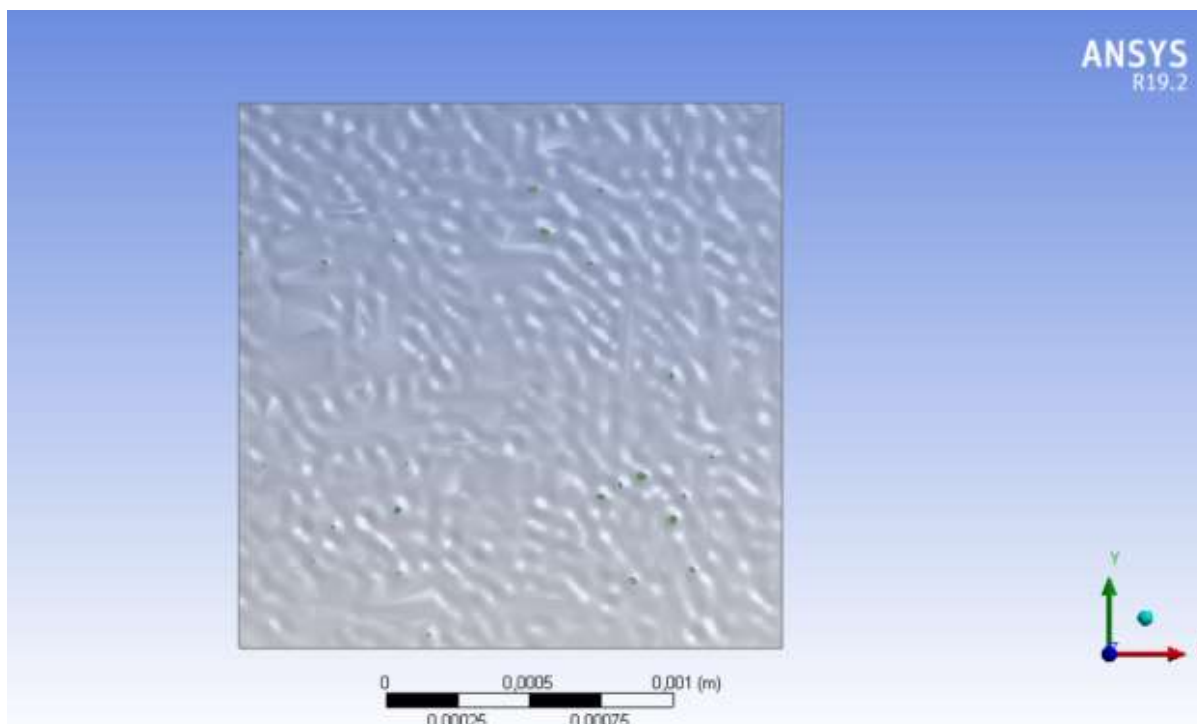


Рис.9.98 Геометрия поверхности для теплового расчета

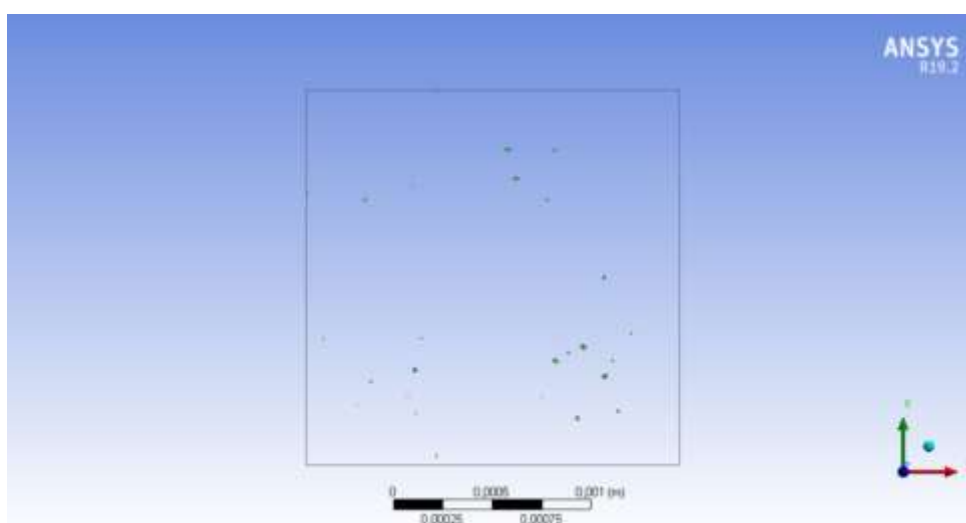


Рис.9.99 Фактическая площадь контакта

Для качественного представления результатов теплового расчета необходимо качественно реализовать расчетную сетку. Использована функция ограничения максимального размера ячейки контакта, что важно для распространения тепла.

Сетка построена с помощью функции Body Sizing с треугольными элементами и максимальным размером ячейки  $2,3 \cdot 10^{-5}$  рис. 55. С помощью

настроек сетки удалось получить ее оптимальные размеры, благодаря которым можно легко увидеть микронеровности. Такие настройки позволяют более детально увидеть поле температур в зоне контакта. Количество элементов сетки – 514971, количество узлов – 750228.

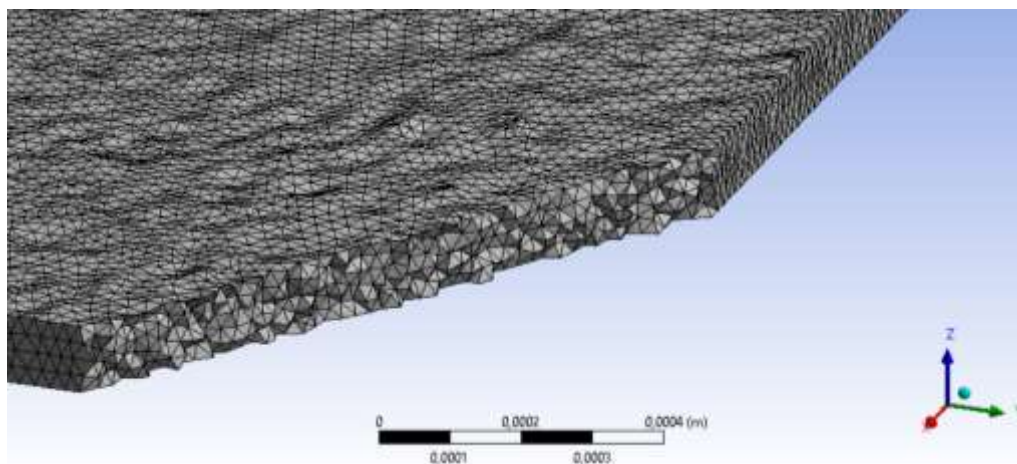


Рис.9.100 Сеточная модель для теплового анализа

После передачи сеточной модели (рис.9.100) в модуль расчета для нее были заданы граничные условия рис. 9.101 следующего типа:

- Нагрузка А: к верхней границе приложена температура  $T$ , которое изменяется в диапазоне 200 до 1200 С
- Нагрузка В: к нижней поверхности приложен тепловой поток равный  $10000 \text{ В/м}^2$
- Нагрузка С: перенос тепла излучением для двух противоположных поверхностей, степень черноты 0,7

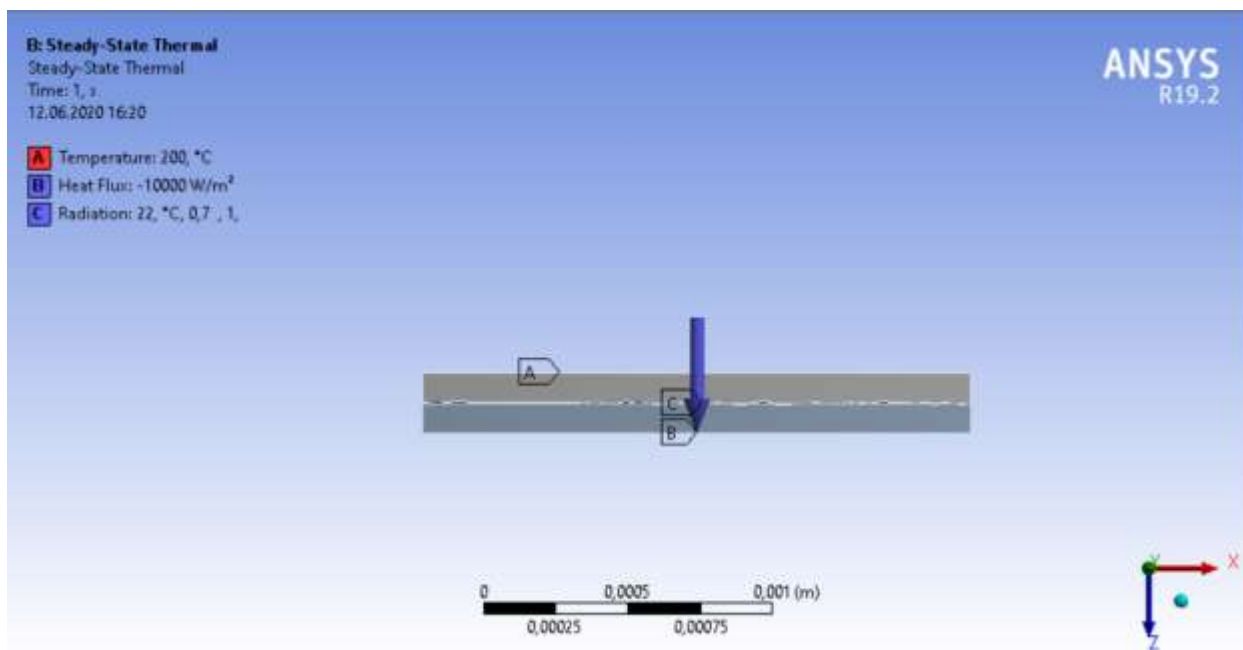


Рис.9.101 Граничные условия

Тепловой расчет проводился для 450 различных моделей при разных значениях межконтактного давления, температурах и углах армирования. Пример поля температур на рисунке 9.102.

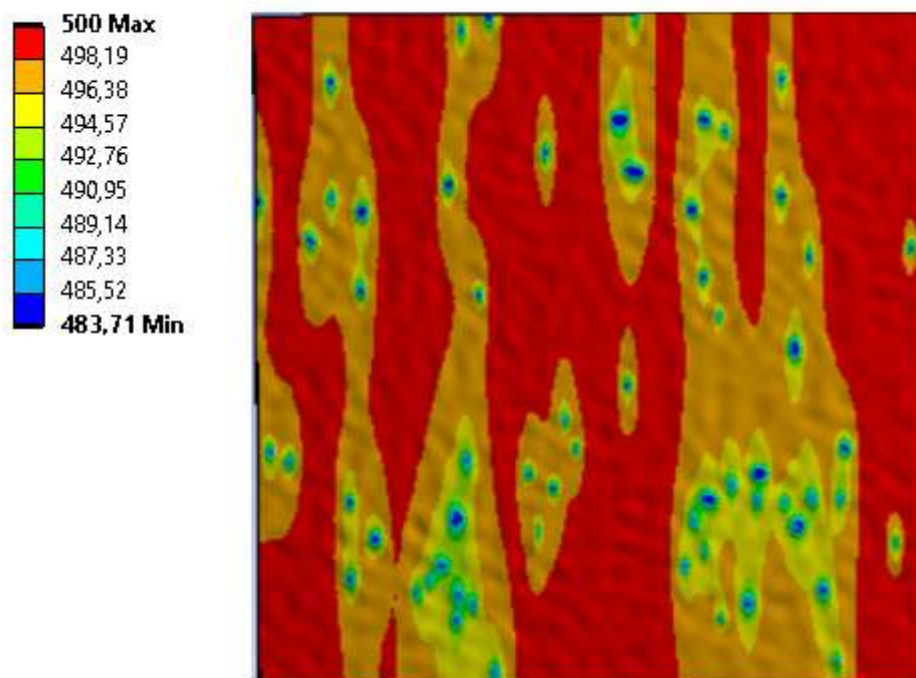


Рис.9.102 Поле температур контактной поверхности

Полученные значения температур, контактирующих поверхностях использовались для расчета КТС между соответствующими парами материалов.

Величина контактного термического сопротивления  $R_k$  определяется как перепад температур, возникающий за счет стягивания линий теплового потока к контактными пятнами, к средней величине плотности теплового потока. Располагая картиной формирования площади контакта, была задана температура верхнего образца, а также тепловой поток, отводимый с другого конца. При этом величина контактного термического сопротивления определяется по формуле:

$$R_k = \frac{T_{\text{верх}} - T_{\text{нижн}}}{q}, \text{ где}$$

$T_{\text{верх}}$ ,  $T_{\text{нижн}}$  – средние температуры на поверхности горячей и холодной стороны.

Некоторые результаты расчетов представлены ниже в виде графиков и таблиц.

Проектирование проводилось для условий самого теплонапряжённого режима «Взлёт». Результаты расчетов приведены на рис. 9.103-106 и в таблицах 5 – 8.

## Зона А

Таблица 5 Контактное термическое сопротивление при давлении 1 МПа.  
 $R \cdot 10^{-4}$

| Давление,<br>МПа | R [90]  | R<br>[0]+[90] | R[[30]+[90]] | R<br>[45]+[90] | R<br>[60]+[90] | R<br>[-60]+[90]<br>+[60] |
|------------------|---------|---------------|--------------|----------------|----------------|--------------------------|
| 0,1              | 278,866 | 181,593       | 218,14       | 190,33         | 185,37         | 165,32                   |
| 0,3              | 265,941 | 152,3         | 195,2        | 171,2          | 165,4          | 155,04                   |
| 0,4              | 134,439 | 120,2         | 131,852      | 128,3          | 124,2          | 122,3                    |
| 0,5              | 128,76  | 118,2         | 125,21       | 123,47         | 121,3          | 121,5                    |
| 0,7              | 102,788 | 62,1          | 97,253       | 81,2           | 72,3           | 68,3                     |
| 1                | 72,33   | 36,53         | 67,56        | 60,2           | 48,2           | 40,05                    |
| 2                | 40,39   | 21,3          | 34,2         | 30,1           | 25,6           | 23,12                    |
| 3                | 31,27   | 18,23         | 29,6         | 25,14          | 21,6           | 22,1                     |
| 4                | 22,43   | 12,3          | 19,889       | 15,89          | 15,01          | 13,8                     |
| 5                | 18,26   | 9,97          | 15,2         | 13,2           | 12,06          | 10,95                    |
| 6                | 15,98   | 8,01          | 14,2         | 12,87          | 11,69          | 8,88                     |
| 7                | 13,51   | 7,42          | 12,2         | 11,01          | 10,31          | 8,01                     |
| 8                | 11,08   | 6,5           | 10,8         | 9,99           | 8,2            | 7,62                     |

|    |       |      |      |      |     |      |
|----|-------|------|------|------|-----|------|
| 9  | 10,58 | 5,75 | 9,5  | 9,6  | 7,1 | 6,12 |
| 10 | 10,01 | 5,04 | 9,01 | 7,85 | 6,5 | 5,81 |

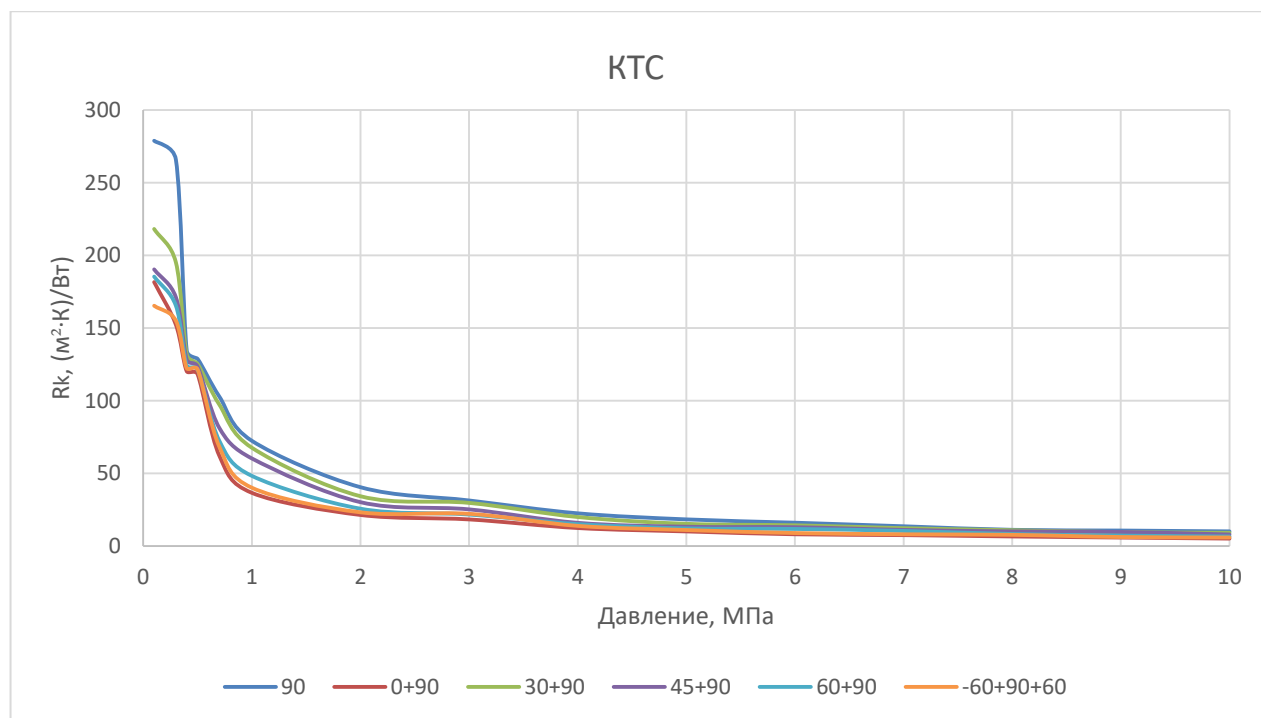


Рис.9.103 Контактное термическое сопротивление при давлении 1 МПа

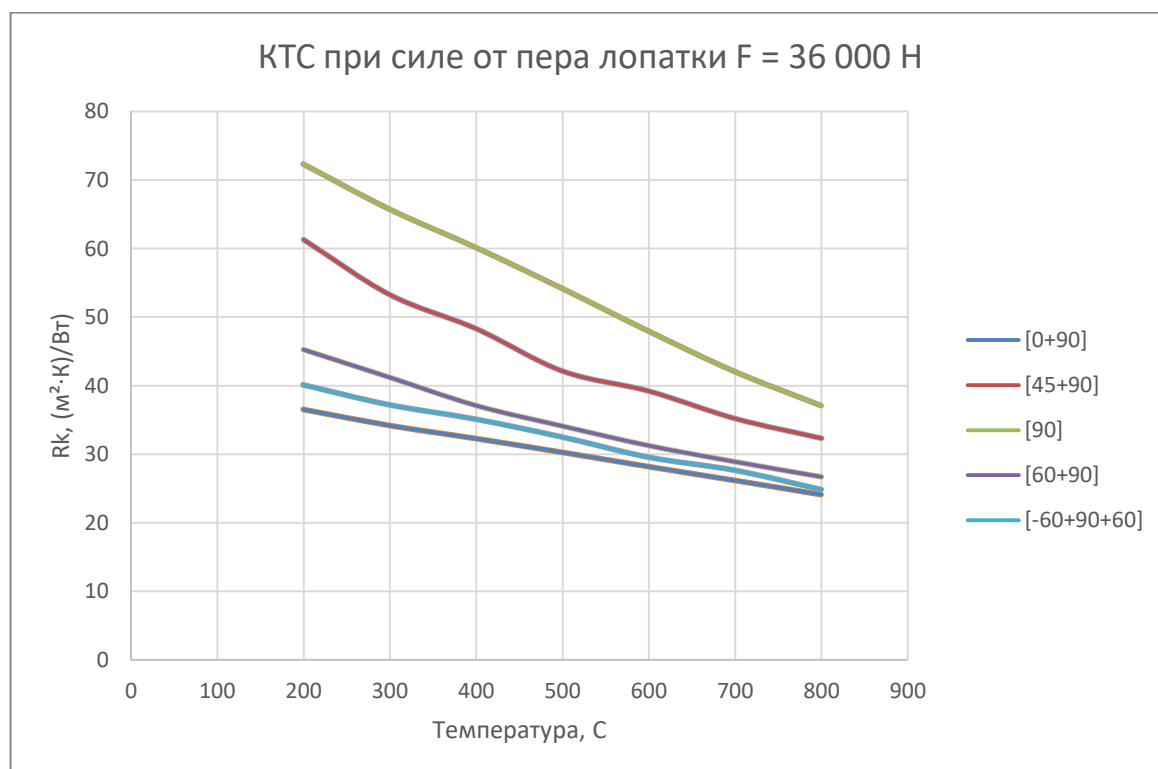


Рис.9.104 Контактное термическое сопротивление при силе от пера лопатки  $F = 36\,000\text{ Н}$ .

Зона А

Таблица 6 Контактное термическое сопротивление при силе от пера лопатки

F = 36 000 Н. Зона А

| Угол          | Смещение | Тепловой<br>поток Вт/м <sup>2</sup> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | R*10 <sup>-4</sup> ,<br>м <sup>2</sup> С/Вт |
|---------------|----------|-------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------------------|
| 0+90          | 2,42E-06 | 10000                               | 199,48         | 162,95         | 36,53                                       |
|               | 2,42E-06 |                                     | 299,49         | 265,3          | 34,19                                       |
|               | 2,42E-06 |                                     | 399,5          | 367,22         | 32,28                                       |
|               | 2,42E-06 |                                     | 499,5          | 469,23         | 30,27                                       |
|               | 2,42E-06 |                                     | 599,49         | 571,3          | 28,19                                       |
|               | 2,42E-06 |                                     | 699,49         | 673,32         | 26,17                                       |
|               | 2,42E-06 |                                     | 799,48         | 775,37         | 24,11                                       |
| 45+90         | 1,70E-06 | 10000                               | 199,96         | 158,05         | 61,3                                        |
|               | 1,70E-06 |                                     | 299,96         | 261,11         | 53,26                                       |
|               | 1,70E-06 |                                     | 399,96         | 363,68         | 48,3                                        |
|               | 1,70E-06 |                                     | 499,96         | 466,43         | 42,12                                       |
|               | 1,70E-06 |                                     | 599,96         | 569,26         | 39,2                                        |
|               | 1,70E-06 |                                     | 699,96         | 671,84         | 35,2                                        |
|               | 1,70E-06 |                                     | 799,96         | 774,4          | 32,32                                       |
| 90            | 1,89E-06 | 10000                               | 199,46         | 127,13         | 72,33                                       |
|               | 1,89E-06 |                                     | 299,47         | 233,73         | 65,74                                       |
|               | 1,89E-06 |                                     | 399,47         | 339,32         | 60,15                                       |
|               | 1,89E-06 |                                     | 499,47         | 445,29         | 54,18                                       |
|               | 1,89E-06 |                                     | 599,47         | 551,51         | 47,96                                       |
|               | 1,89E-06 |                                     | 699,47         | 657,41         | 42,06                                       |
|               | 1,89E-06 |                                     | 799,47         | 762,38         | 37,09                                       |
| 60+90         | 1,82E-06 | 10000                               | 199,76         | 154,5          | 45,26                                       |
|               | 1,82E-06 |                                     | 299,77         | 258,57         | 41,2                                        |
|               | 1,82E-06 |                                     | 399,77         | 362,67         | 37,1                                        |
|               | 1,82E-06 |                                     | 499,77         | 465,67         | 34,1                                        |
|               | 1,82E-06 |                                     | 599,77         | 568,52         | 31,25                                       |
|               | 1,82E-06 |                                     | 699,77         | 670,87         | 28,9                                        |
|               | 1,82E-06 |                                     | 799,77         | 773,07         | 26,7                                        |
| -<br>60+90+60 | 1,9E-06  | 10000                               | 199,25         | 159,13         | 40,12                                       |
|               | 1,9E-06  |                                     | 299,14         | 261,93         | 37,21                                       |
|               | 1,9E-06  |                                     | 399,67         | 364,57         | 35,1                                        |
|               | 1,9E-06  |                                     | 499,67         | 467,17         | 32,5                                        |
|               | 1,9E-06  |                                     | 599,67         | 570,11         | 29,56                                       |
|               | 1,9E-06  |                                     | 699,67         | 672,02         | 27,65                                       |
|               | 1,9E-06  |                                     | 799,67         | 774,82         | 24,85                                       |



## Зона Б

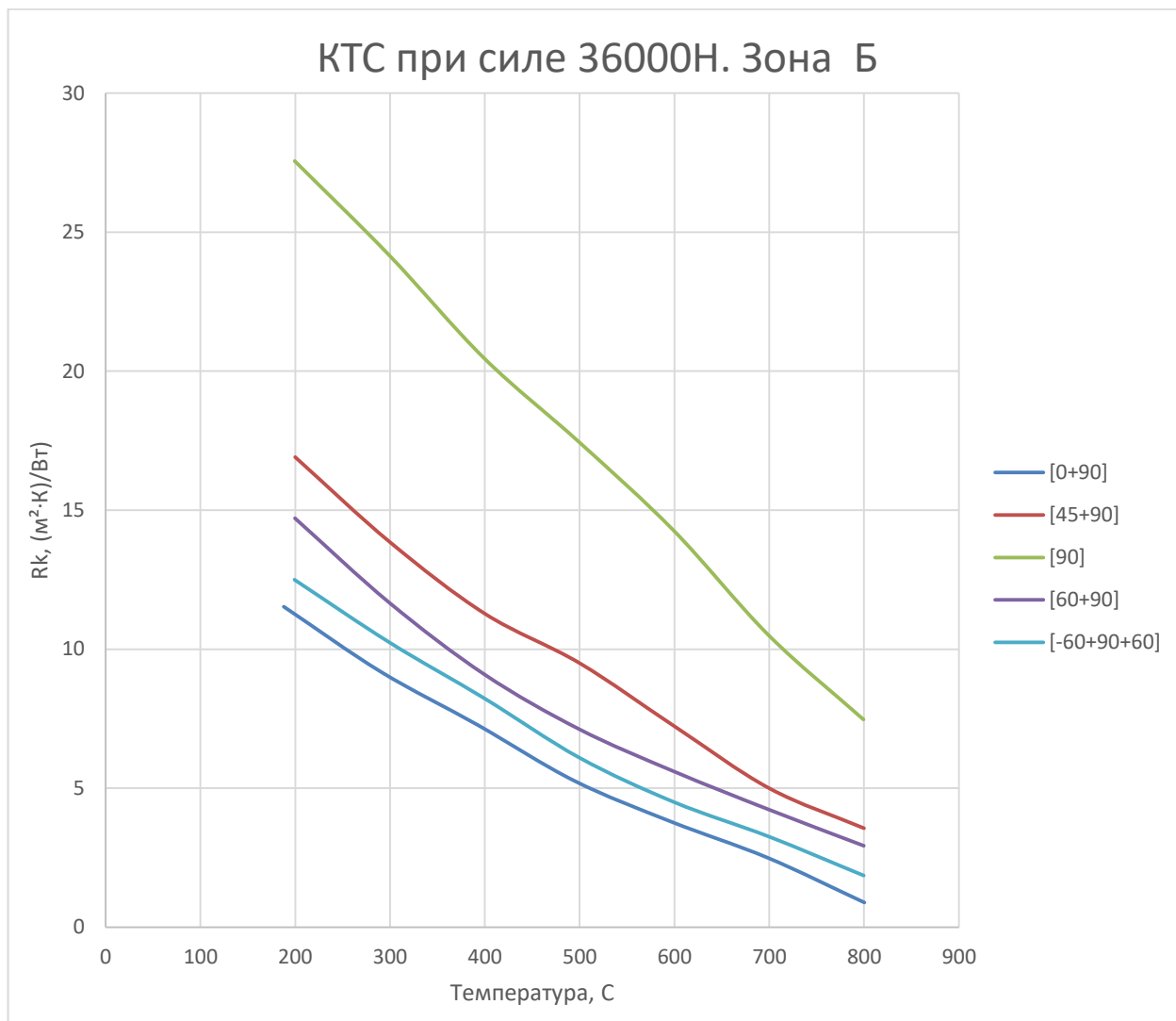


Рис.9.105 Контактное термическое сопротивление при силе от пера лопатки  $F = 36\,000\text{ Н}$ .  
Зона В

Таблица 7 Контактное термическое сопротивление при силе от пера лопатки  
 $F = 36\,000\text{ Н}$ . Зона В

| Угол | Смещение | Heat flux<br>W/m <sup>3</sup> | T average,<br>hot | T average,<br>cold | $R \cdot 10^{-4}$ ,<br>м <sup>2</sup> С/Вт |
|------|----------|-------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------------------|
| 0+90 | 2,42E-06 | 10000                         | 199,48            | 187,95             | 11,53                                      |
|      | 2,42E-06 |                               | 299,49            | 290,3              | 9,19                                       |
|      | 2,42E-06 |                               | 399,5             | 392,22             | 7,28                                       |
|      | 2,42E-06 |                               | 499,5             | 494,23             | 5,27                                       |
|      | 2,42E-06 |                               | 599,49            | 596,3              | 3,8                                        |
|      | 2,42E-06 |                               | 699,49            | 698,32             | 2,5                                        |
|      | 2,42E-06 |                               | 799,48            | 800,37             | 0,89                                       |

|               |          |       |        |        |       |
|---------------|----------|-------|--------|--------|-------|
| 45+90         | 1,70E-06 | 10000 | 199,96 | 183,05 | 16,91 |
|               | 1,70E-06 |       | 299,96 | 286,11 | 13,85 |
|               | 1,70E-06 |       | 399,96 | 388,68 | 11,28 |
|               | 1,70E-06 |       | 499,96 | 491,43 | 9,5   |
|               | 1,70E-06 |       | 599,96 | 594,26 | 7,23  |
|               | 1,70E-06 |       | 699,96 | 696,84 | 5     |
|               | 1,70E-06 |       | 799,96 | 799,4  | 3,56  |
| 90            | 1,89E-06 | 10000 | 199,46 | 162,13 | 27,56 |
|               | 1,89E-06 |       | 299,47 | 258,73 | 24,16 |
|               | 1,89E-06 |       | 399,47 | 364,32 | 20,46 |
|               | 1,89E-06 |       | 499,47 | 470,29 | 17,45 |
|               | 1,89E-06 |       | 599,47 | 576,51 | 14,26 |
|               | 1,89E-06 |       | 699,47 | 682,41 | 10,5  |
|               | 1,89E-06 |       | 799,47 | 792    | 7,47  |
| 60+90         | 1,89E-06 | 10000 | 199,76 | 185,05 | 14,71 |
|               | 1,89E-06 |       | 299,77 | 288,11 | 11,66 |
|               | 1,89E-06 |       | 399,77 | 390,68 | 9,09  |
|               | 1,89E-06 |       | 499,77 | 491,43 | 7,12  |
|               | 1,89E-06 |       | 599,77 | 596,26 | 5,6   |
|               | 1,89E-06 |       | 699,77 | 696,84 | 4,23  |
|               | 1,89E-06 |       | 799,77 | 799,4  | 2,93  |
| -<br>60+90+60 | 1,89E-06 | 10000 | 199,25 | 187,95 | 12,5  |
|               | 1,89E-06 |       | 299,14 | 290,3  | 10,25 |
|               | 1,89E-06 |       | 399,67 | 392,22 | 8,23  |
|               | 1,89E-06 |       | 499,67 | 494,23 | 6,1   |
|               | 1,89E-06 |       | 599,67 | 596,3  | 4,5   |
|               | 1,89E-06 |       | 699,67 | 698,32 | 3,26  |
|               | 1,89E-06 |       | 799,67 | 800,37 | 1,86  |

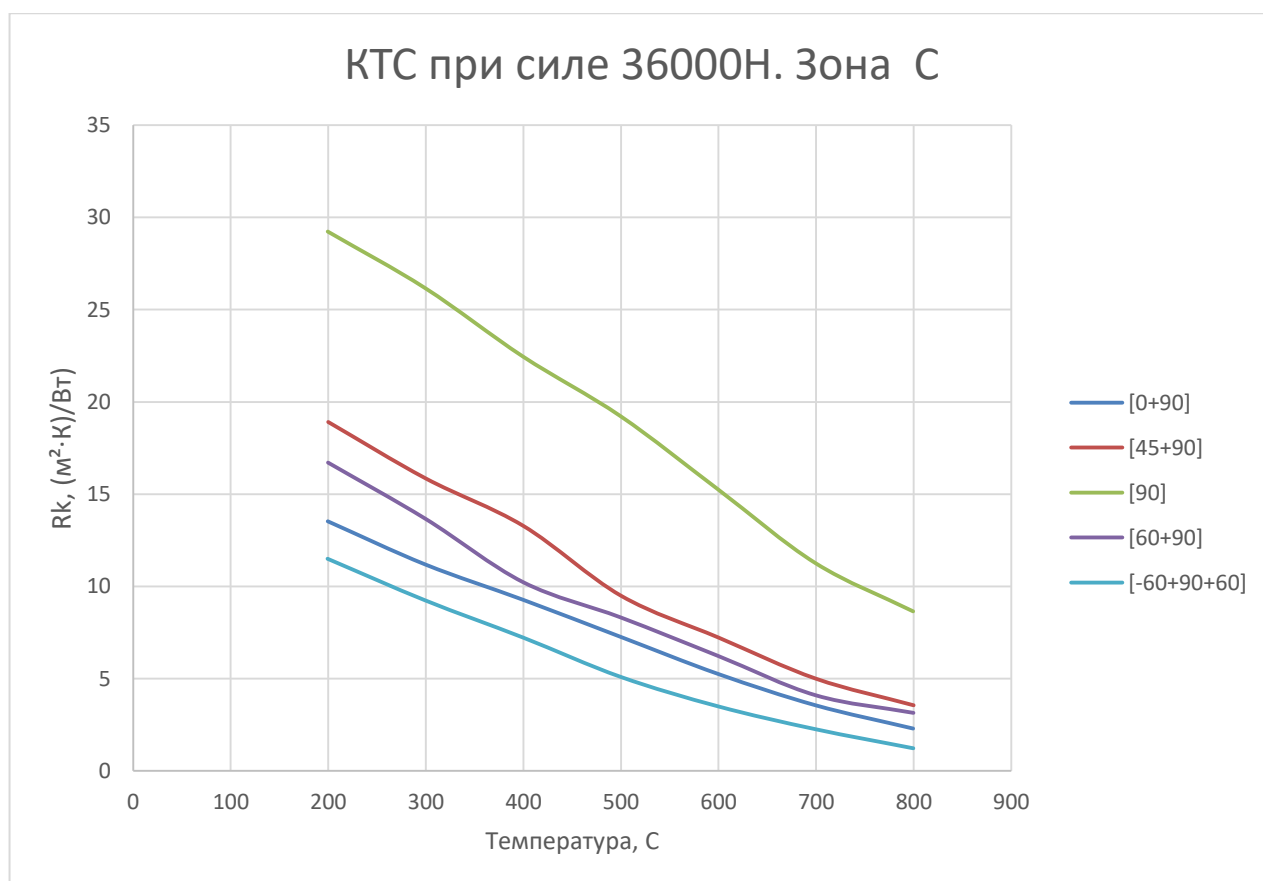


Рис.9.106 Контактное термическое сопротивление при силе от пера лопатки  $F = 36\,000\text{ Н}$ .  
Зона С

Таблица 8 Контактное термическое сопротивление при силе от пера лопатки  
 $F = 36\,000\text{ Н}$ . Зона С

| Угол  | Смещение | Тепловой<br>поток<br>$\text{Вт/м}^2$ | $T_1$  | $T_2$  | $R \cdot 10^{-4},$<br>$\text{м}^2\text{C/Вт}$ |
|-------|----------|--------------------------------------|--------|--------|-----------------------------------------------|
| 0+90  | 2,42E-06 | 10000                                | 199,48 | 185,95 | 13,53                                         |
|       | 2,42E-06 |                                      | 299,49 | 288,3  | 11,19                                         |
|       | 2,42E-06 |                                      | 399,5  | 390,22 | 9,28                                          |
|       | 2,42E-06 |                                      | 499,5  | 492,23 | 7,27                                          |
|       | 2,42E-06 |                                      | 599,49 | 594,3  | 5,26                                          |
|       | 2,42E-06 |                                      | 699,49 | 696,32 | 3,56                                          |
|       | 2,42E-06 |                                      | 799,48 | 798,37 | 2,3                                           |
| 45+90 | 1,70E-06 | 10000                                | 199,96 | 181,05 | 18,91                                         |
|       | 1,70E-06 |                                      | 299,96 | 284,11 | 15,85                                         |
|       | 1,70E-06 |                                      | 399,96 | 386,68 | 13,28                                         |
|       | 1,70E-06 |                                      | 499,96 | 489,43 | 9,5                                           |
|       | 1,70E-06 |                                      | 599,96 | 592,26 | 7,23                                          |

|          |          |       |        |        |       |
|----------|----------|-------|--------|--------|-------|
|          | 1,70E-06 |       | 699,96 | 694,84 | 5     |
|          | 1,70E-06 |       | 799,96 | 797,4  | 3,56  |
| 90       | 1,89E-06 | 10000 | 199,46 | 160,13 | 29,23 |
|          | 1,89E-06 |       | 299,47 | 258,73 | 26,16 |
|          | 1,89E-06 |       | 399,47 | 364,32 | 22,46 |
|          | 1,89E-06 |       | 499,47 | 470,29 | 19,23 |
|          | 1,89E-06 |       | 599,47 | 576,51 | 15,26 |
|          | 1,89E-06 |       | 699,47 | 682,41 | 11,26 |
|          | 1,89E-06 |       | 799,47 | 792    | 8,65  |
|          | 1,89E-06 |       | 199,76 | 185,05 | 16,71 |
| 60+90    | 1,89E-06 | 10000 | 299,77 | 288,11 | 13,66 |
|          | 1,89E-06 |       | 399,77 | 390,68 | 10,23 |
|          | 1,89E-06 |       | 499,77 | 491,43 | 8,32  |
|          | 1,89E-06 |       | 599,77 | 596,26 | 6,23  |
|          | 1,89E-06 |       | 699,77 | 696,84 | 4,1   |
|          | 1,89E-06 |       | 799,77 | 799,4  | 3,15  |
|          | 1,89E-06 |       | 199,25 | 187,95 | 11,5  |
|          | 1,89E-06 |       | 299,14 | 290,3  | 9,25  |
| 60+90+60 | 1,89E-06 | 10000 | 399,67 | 392,22 | 7,23  |
|          | 1,89E-06 |       | 499,67 | 494,23 | 5,1   |
|          | 1,89E-06 |       | 599,67 | 596,3  | 3,5   |
|          | 1,89E-06 |       | 699,67 | 698,32 | 2,26  |
|          | 1,89E-06 |       | 799,67 | 800,37 | 1,23  |
|          | 1,89E-06 |       |        |        |       |
|          | 1,89E-06 |       |        |        |       |
|          | 1,89E-06 |       |        |        |       |

### 9.2.7. Расчет теплонапряженного состояния замкового соединения керамических лопаток типа «ласточкин хвост»

Для оценки влияния термического контактного сопротивления и теплофизических характеристик керамического материала на тепловое состояние рассматривалась первая ступень турбины высокого давления с тепловыми граничными условиями 3 рода, соответствующими режиму взлёта.

Исследовался перепад температур в области контакта керамической лопатки с металлическим диском (рис. 9.107.).



Рис.9.107 Исследуемая модель

При использовании лопаток из керамического материала с  $\lambda_{\text{л}} = 15 \text{ Вт/}(\text{м} \cdot ^\circ \text{C})$  перепад в лопатке  $\Delta T$  существенно больше, чем при  $\lambda_{\text{л}} = 300 \text{ Вт/}(\text{м} \cdot ^\circ \text{C})$ :  $485^\circ \text{C}$  и  $214^\circ \text{C}$  соответственно. Максимальное значение температуры лопатки при угле армирования волокон  $[0]$  в первом случае  $987^\circ \text{C}$ , во втором –  $972^\circ \text{C}$ . При этом во втором случае происходит больший перегрев металлического диска, степень которого зависит от термической проводимости контакта. Контактная термическая проводимость задавалась на основании расчета, проведенного выше. При этом учитывалось направление волокон в узле лопатки.

На рисунке 9.108. показано влияние коэффициента теплопроводности керамической лопатки на максимальную температуру нагрева ободной части металлического диска. На рис. 9.109 – 9.111 представлены контактные напряжения в модели с лопатками.

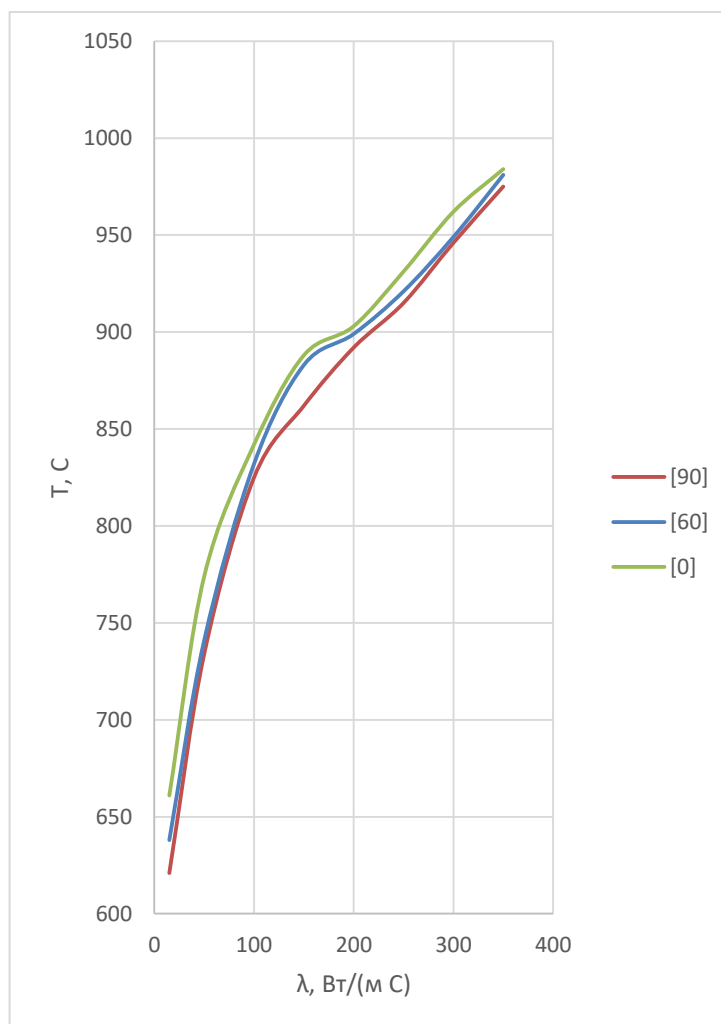


Рис.9.108 Влияние коэффициента теплопроводности керамической лопатки

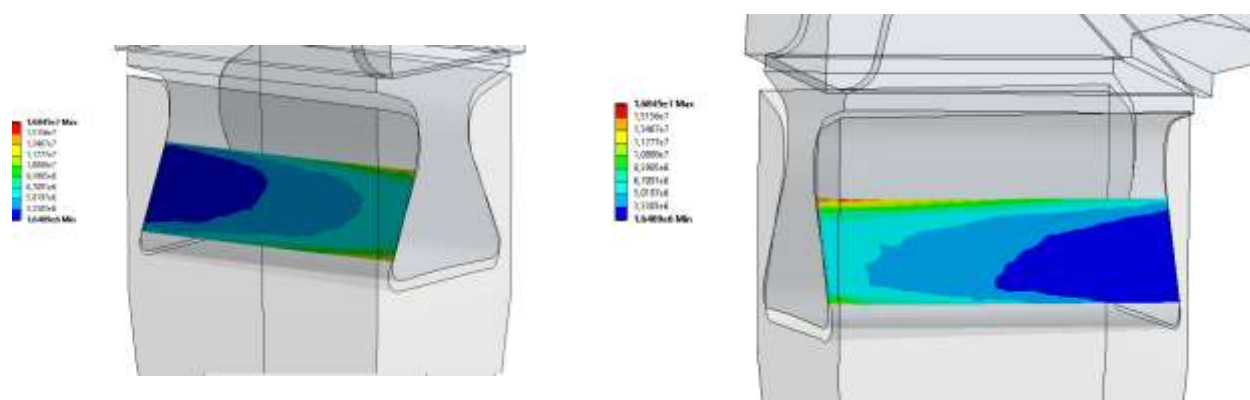


Рис.9.109 Контактные напряжения в модели с лопатками при  $[0]$ , МПа

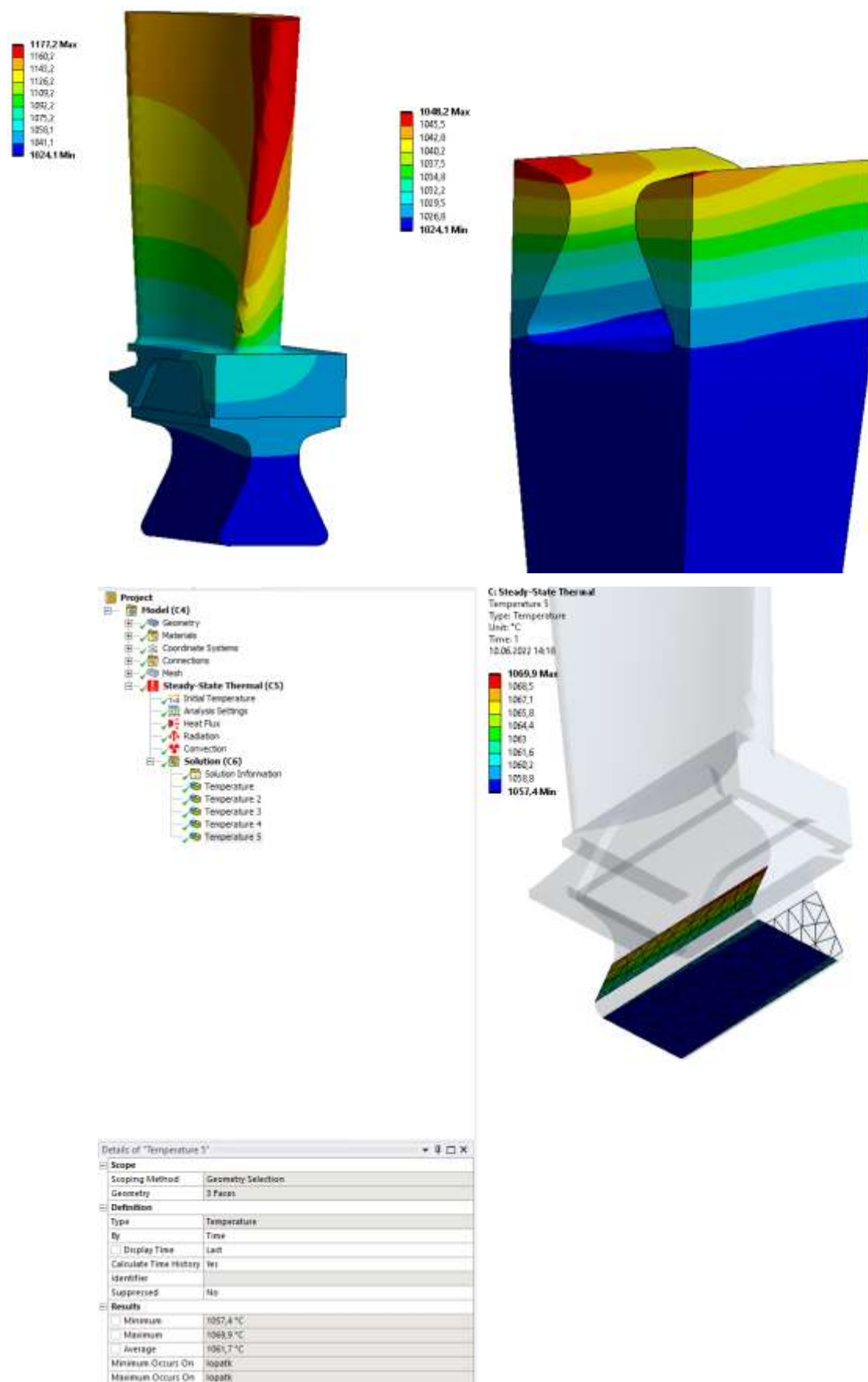


Рис.9.110 Теплонапряженное состояние диска и лопатки, МПа

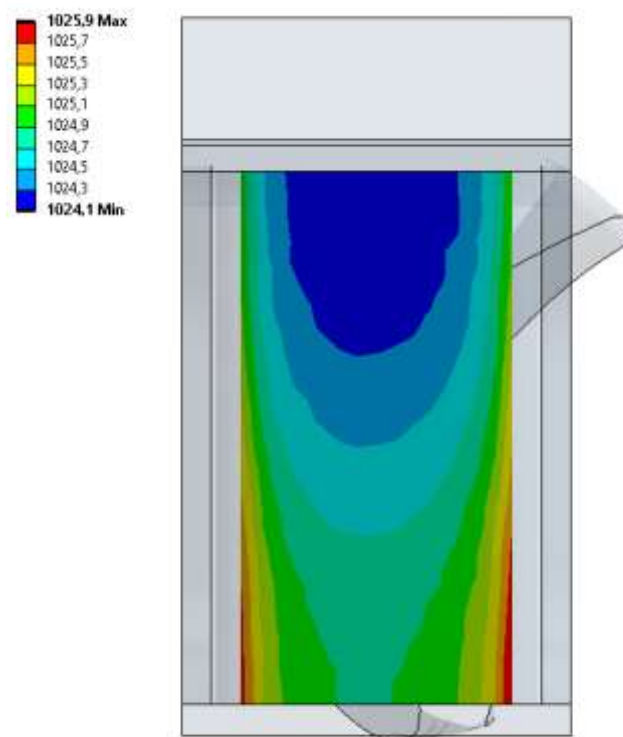


Рис.9.111 Теплонапряжённое состояние диска и лопатки, МПа

Предел прочности на растяжение керамического хвостовика при задаваемом уровне надёжности с учётом эффективного объёма  $V_{и}/V_{ef}=0,33$ . На рисунке представлены зависимости расчётных значений прочности керамических материалов лопаток от различных параметров надёжности.

Для оценки влияния коэффициента линейного теплового расширения керамического материала на максимальные значения растягивающих и контактных напряжений в лопатке рассматривалась первая ступень турбины высокого давления с тепловыми граничными условиями 3 рода, соответствующими режиму взлёта авиационного гражданского газотурбинного двигателя.

С целью более подробного анализа напряжённого состояния керамических хвостовиков лопаток построены двухмерные конечно-элементные модели замкового соединения, рис. 9.112.

Принималось, что угловая частота вращения  $\omega=1500$  рад/с, сила от пера лопатки  $F_{л}=36000$  Н. Результаты расчета на рис. 9.113, 9.114.



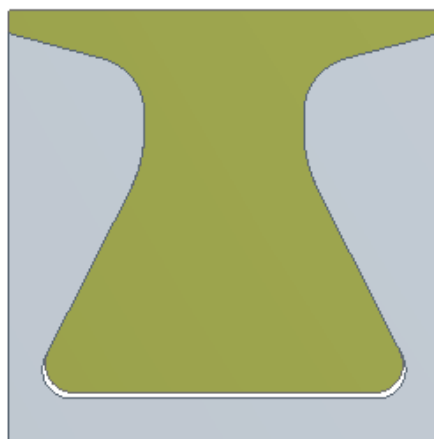


Рис.9.112 Рис. модель замкового соединения керамических лопаток и металлического диска

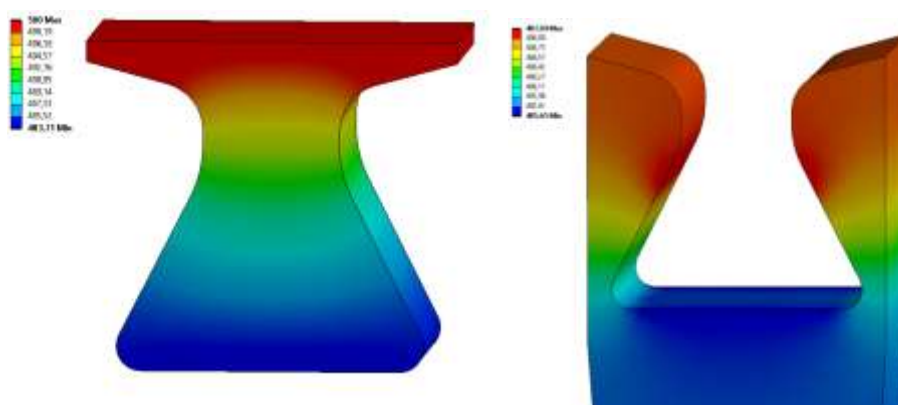


Рис.9.113 Теплонапряженное состояние замковой части лопаток

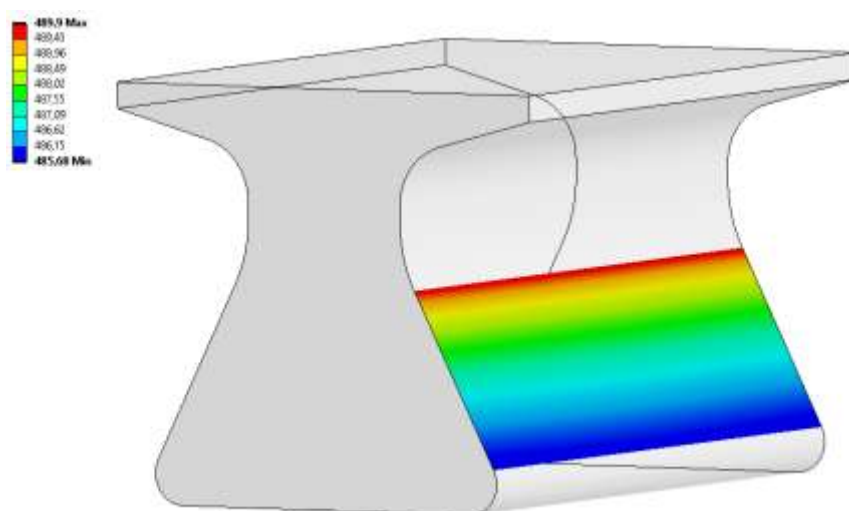


Рис.9.114 Теплонапряженное состояние контактной зоны замковой части лопаток

Проведенное численное исследование теплового состояния рабочей лопатки из композиционных материалов, с учетом анизотропии теплофизических свойств материала, нагрева и смещения контактирующих поверхностей относительно друг друга, показало, что учет анизотропии свойств в межконтактной области играет существенную роль при определении контактного термического сопротивления, особенно при низких значениях сжимающих нагрузок и высоких температурах эксплуатации.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что при проектировании можно задавать теплофизические свойства материала теплонагруженных элементов из КМК основанные на использовании эффекта анизотропии, которые необходимо учитывать при моделировании. Использование анизотропных свойств КМК при производстве рабочих лопаток позволяет повысить температуру рабочего тела, а следовательно топливную и экологическую эффективность двигательной установки.

В связи с тем, что композитная лопатка турбины и сварное соединения металл-композит являются самыми высоконагруженными, как с точки тепловой, так и с механической нагрузки, для корректного определения геометрии замкового соединения требуется достоверные данные о теплофизических свойствах композитного материала и свойствах сварного соединения металл-композит.

При известных о вышеупомянутых исходных данных, дальнейший параметрический расчет геометрии контактного узла позволит определить оптимальные значения напряженного деформированного состояния.

## Выводы по Главе 9

Проведено комплексное исследование теплонапряжённого состояния конструкций жидкостных ракетных двигателей малой тяги и замковых соединений керамических лопаток газотурбинных двигателей с учётом контактного теплообмена. Установлено, что значительные различия в термических коэффициентах линейного расширения материалов приводят к возникновению критических термонапряжений в зонах контакта, особенно при высокотемпературной эксплуатации.

Для ЖРД малой тяги предложена модифицированная геометрия стыковочного узла композитной камеры сгорания и переходной головки, обеспечивающая скольжение поверхностей по заданному углу сопряжения. Определено, что оптимальный диапазон угла  $\alpha$  — 25–27°, что позволяет снизить эквивалентные напряжения в композитной камере до допустимого уровня.

Экспериментально и численно определены параметры шероховатости контактирующих поверхностей, на основе которых построены трёхмерные модели микрогеометрии. С их использованием выполнено численное моделирование контактного взаимодействия и теплопередачи при различных значениях межконтактного давления. Получены зависимости контактного термического сопротивления от давления для пар материалов: КМК-МС/12Х18Н10Т, КМК-МС/ТВ-36, КМК-МС/КМК-МС и 12Х18Н10Т/ТВ-36. Учёт этих значений в термopрочностном расчёте показал необходимость корректировки температурных полей и, как следствие, напряжённого состояния конструкции.

В задаче лопатка–диск разработана параметризованная модель замкового соединения типа «ласточкин хвост» с учётом анизотропии теплофизических и механических свойств композитного материала. Исследовано влияние направления укладки армирующих волокон на контактную жёсткость и тепловое сопротивление. Наилучшие характеристики демонстрирует схема укладки [0] + [90], обеспечивающая минимальное смещение и контактное термическое сопротивление.

Показано, что при проектировании высокотемпературных узлов с разнородными материалами недостаточно использовать усреднённые или идеализированные данные о теплообмене на границе контакта. Необходимо учитывать реальную микрогеометрию поверхностей, межконтактное давление и анизотропию свойств композитов.

В результате выполненных исследований сформирован методологический подход к моделированию контактного теплообмена в сложных конструкциях ракетных и газотурбинных двигателей, позволяющий повысить достоверность расчётов и обеспечить надёжность соединений при экстремальных тепловых и механических нагрузках.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Разработан комплексный метод решения задач контактного теплообмена для энергоэффективного управления тепловыми режимами, базирующийся на цифровом моделировании микрогеометрии поверхностей, конечно-элементном термо-механическом анализе и нейросетевых технологиях.**

Основные новые результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Впервые разработана методика создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, объединяющая два взаимодополняющих алгоритма фильтрации — метод вершин и метод локальных экстремумов. В отличие от традиционных статистических и гауссовых моделей, предложенный подход сохраняет топологические особенности реальной поверхности, обеспечивая оптимальный баланс между точностью воспроизведения микрогеометрии и вычислительной сложностью. Верификация по параметрам  $R_a$ ,  $R_q$  и форме опорной кривой подтверждает высокую адекватность цифровой модели реальной поверхности.

2. Применена и модифицирована фрактальная численно-аналитическая модель КТС, основанная на функции Вейерштрасса–Мандельброта, учитывающая упругие, пластические и упруго-пластические деформации микроконтактов. Модель позволяет восстанавливать микрорельеф по профилограмме с погрешностью менее 0,15 % и обеспечивает физически обоснованное описание взаимодействия шероховатых поверхностей в условиях реальной эксплуатации.

3. Впервые разработана комплексная теоретическая модель контактного теплообмена, интегрирующая механику контакта, теплопередачу через пятна контакта, межконтактную среду и лучистый теплообмен. Установлено, что при высоких температурах (до 1073 К) и низких сжимающих давлениях (0,14 МПа) вакуумной среде вклад излучения может достигать 46 %, что опровергает традиционные представления о его незначительности и требует обязательного учёта в расчётах для космической и авиационной техники.

4. Экспериментально и численно обосновано совместное влияние анизотропии композитных материалов и микрогеометрии контакта на КТС. Установлены оптимальные углы армирования углеродных композитов для

минимизации термического сопротивления, что открывает новые возможности как для новых материалов с заданными свойствами, так и для целенаправленного проектирования теплонапряжённых элементов конструкций изделий с требуемыми теплофизическими и механическими характеристиками

Впервые выявлены оптимальные схемы армирования углеродных композитов ( $[0^\circ+90^\circ]$ ,  $[\pm 60^\circ+90^\circ]$ ), минимизирующие термическое сопротивление в конструкциях с разнородными материалами. Показано, что различие КТС между ориентациями  $[0^\circ]$  и  $[90^\circ]$  может достигать 54 % при 0,2 МПа и 200 °С.

5. Создана многопараметрическая конечно-элементная модель термо-механического взаимодействия, учитывающая анизотропию теплофизических и механических свойств, пластические деформации микронеровностей и лучистый теплообмен. На её основе сгенерирована база из более чем 10 000 синтетических экспериментов, используемая для обучения нейросетевых моделей.

6. Разработана и верифицирована нейросетевая модель (RBF, BP-ANN) для быстрого прогнозирования КТС с точностью до 2,5 %. В отличие от полуэмпирических зависимостей, нейросетевой подход корректно учитывает нелинейные взаимосвязи между давлением, температурой, шероховатостью, свойствами материалов и средой контакта. Модель пригодна для интеграции в CAD/CAE-системы и цифровые двойники.

7. Получены экспериментальные данные значений КТС в атмосферных условиях и в контролируемых средах (вакуум, инертные газы). Погрешность измерений эксперимента, проведенного на оригинальных установках не превышала 7%, что позволило получить уникальные эмпирические зависимости КТС для актуальных в аэрокосмической технике пар материалов в широком диапазоне температур и давлений.

*Практическая значимость работы подтверждена успешной оптимизацией контактных узлов в двух значимых объектов:*

1. Для камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги с композитной оболочкой предложена и обоснована конструкция узла стыковки с изменяемым углом сопряжения, что позволило снизить термонапряжения, вызванные несогласованностью коэффициентов теплового расширения, до приемлемого уровня.

2. Для замкового соединения керамической лопатки и металлического диска газотурбинного двигателя выполнена оценка теплонапряжённого состояния с учётом анизотропии свойств композита и реального КТС.

В результате выполненных исследований сформирован методологический подход к моделированию контактного теплообмена в сложных конструктивных узлах и элементах ракетных и газотурбинных двигателей, позволяющий повысить достоверность расчётов и обеспечить надёжность соединений при экстремальных тепловых и механических нагрузках.

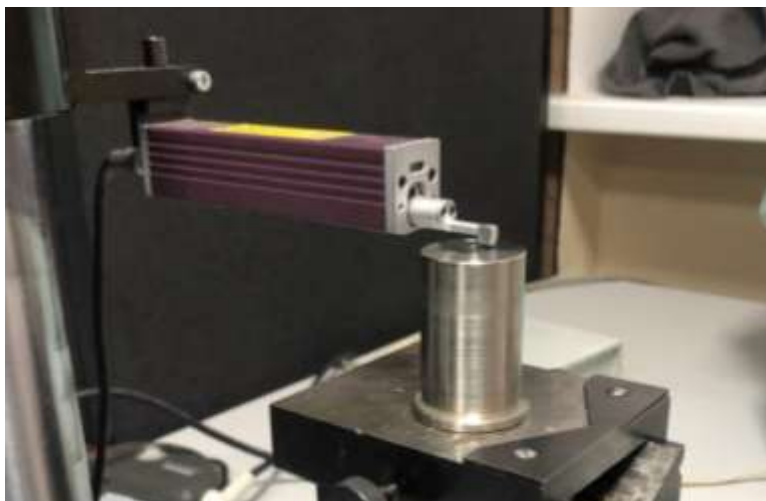
3. Сформирован универсальный расчётно-аналитический инструмент, обеспечивающий снижение неопределённости в прогнозировании КТС до величин  $\leq 7\%$ . Это позволяет на ранних стадиях проектирования обеспечивать заданные тепловые режимы, повышать ресурс и надёжность теплонапряжённых агрегатов на 25–30 % и сокращать сроки отработки конструкций за счёт перехода от итерационного к предсказательному моделированию.

4. Результаты исследований успешно внедрены в учебные дисциплины МАИ «Современные программные средства теплового проектирования», «Контактный теплообмен в элементах и агрегатах атмосферных и космических ЛА», «Контактные задачи теплообмена», «Нейросетевые вычислительные технологии в задачах теплотехники», «Проектирование информационных сетей тепловых процессов».

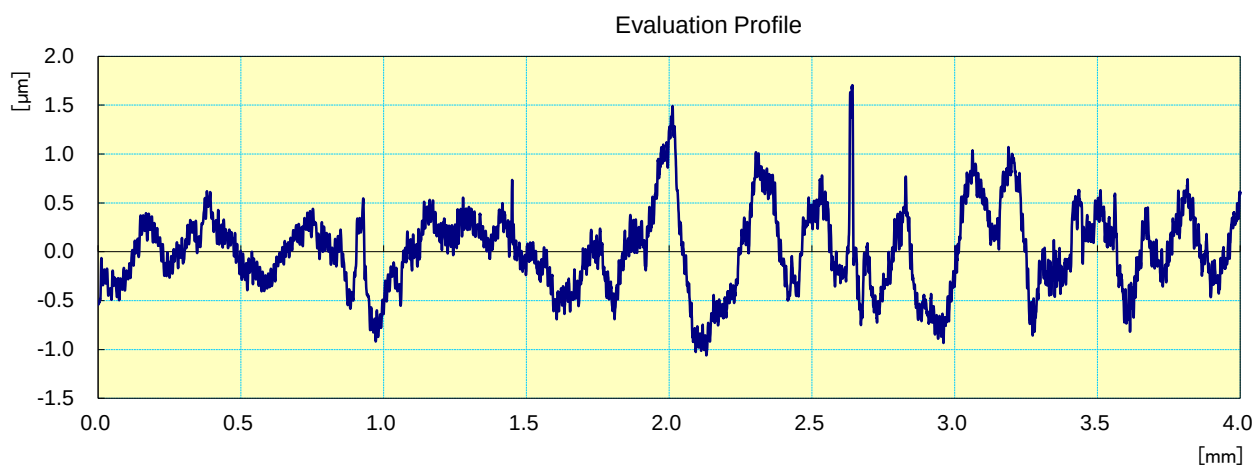
Таким образом, реализованный в работе подход, сочетающий физическое экспериментальное исследование, многоуровневое численное моделирование и современные методы искусственного интеллекта, позволил снизить неопределённость в расчётах КТС реальных изделий до приемлемого для инженерного проектирования уровня (не более 7%). Это создало научно-технические предпосылки для повышения эффективности, надёжности и ресурса современных лёгких конструкций летательных аппаратов и энергоустановок, а также способствует совершенствованию технологий их проектирования и производства.

## Приложение 1. Измерения микрогеометрии экспериментальных образцов

Материал образца – 12Х10Н8Т



Измерение  
шероховатости образца  
на профилографе

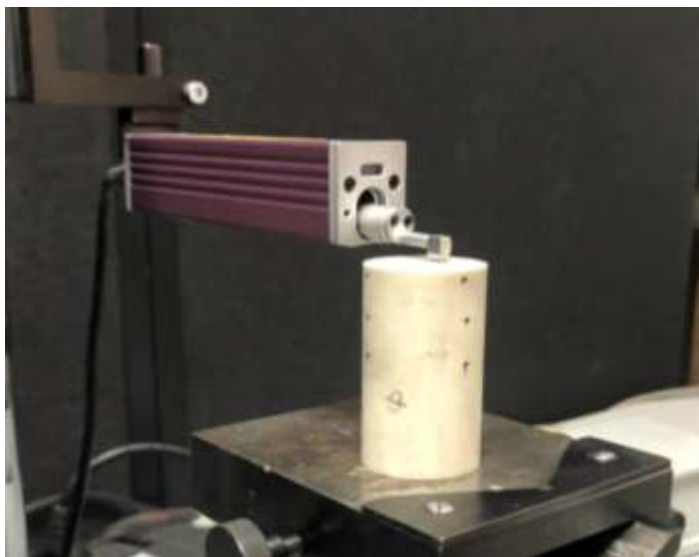


Профиль шероховатости  
Результаты измерения

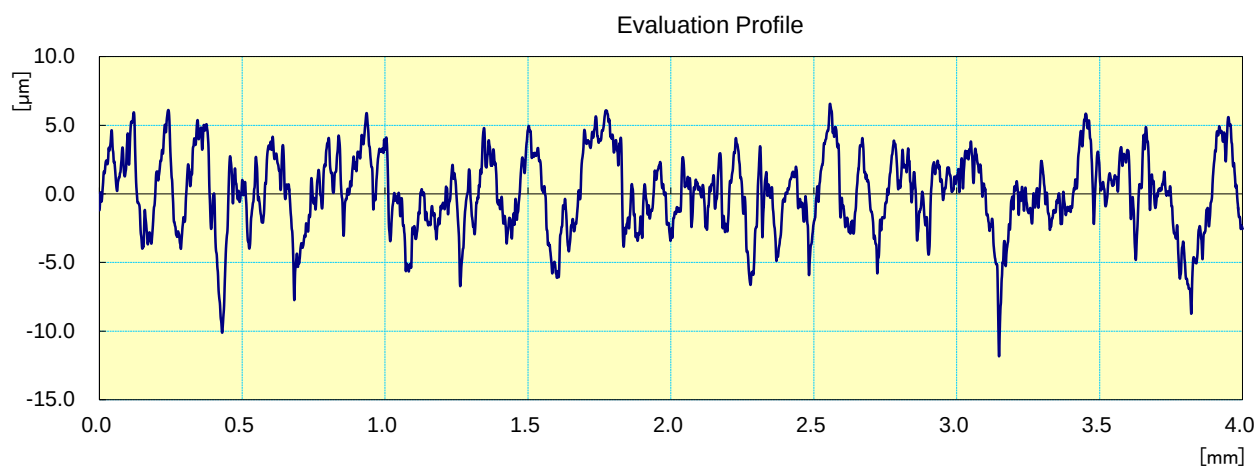
|             |          |         |       |
|-------------|----------|---------|-------|
| Standard    | ISO 1997 | N       | 5     |
| Profile     | R        | Cut-Off | 0.8mm |
| $\lambda_s$ | 2.5μm    | Filter  | GAUSS |
|             |          |         |       |
| Ra          | 0.328 μm |         |       |
| Rq          | 0.398 μm |         |       |
| Rz          | 1.973 μm |         |       |
|             |          |         |       |



Материал образца – фарфор



Измерение  
шероховатости образца  
на профилографе

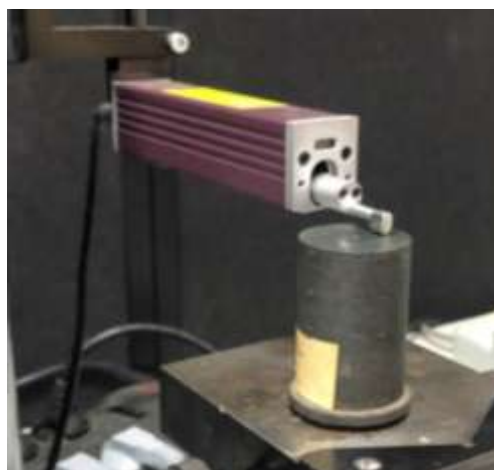


Профиль шероховатости

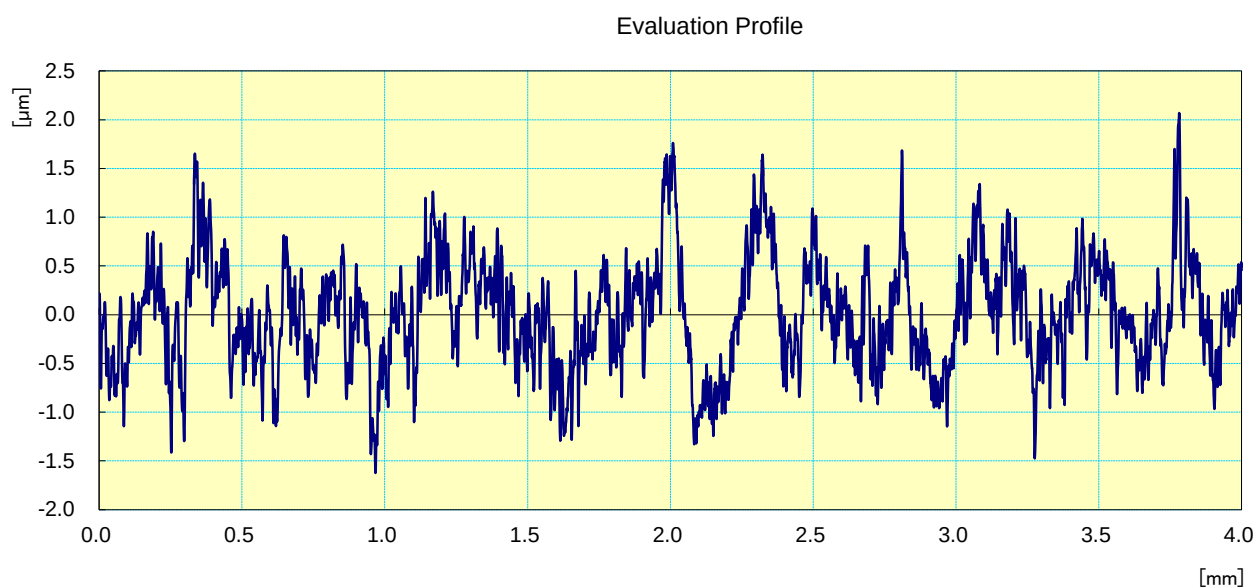
Результаты измерения

|             |                |         |       |
|-------------|----------------|---------|-------|
| Standard    | ISO 1997       | N       | 5     |
| Profile     | R              | Cut-Off | 0.8mm |
| $\lambda_s$ | 2.5 $\mu$ m    | Filter  | GAUSS |
|             |                |         |       |
| Ra          | 2.275 $\mu$ m  |         |       |
| Rq          | 2.845 $\mu$ m  |         |       |
| Rz          | 14.910 $\mu$ m |         |       |
|             |                |         |       |

Материал образца – Мо



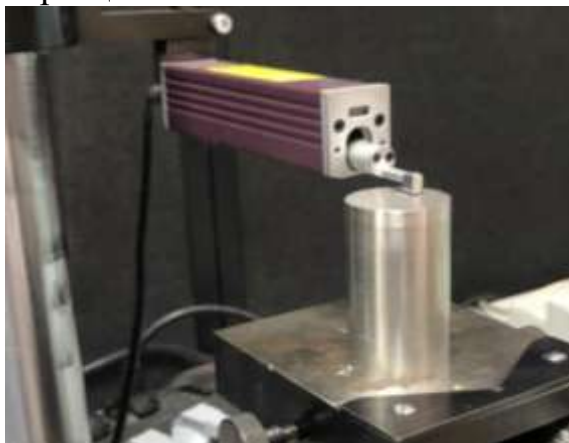
Измерение  
шероховатости образца  
на профилографе



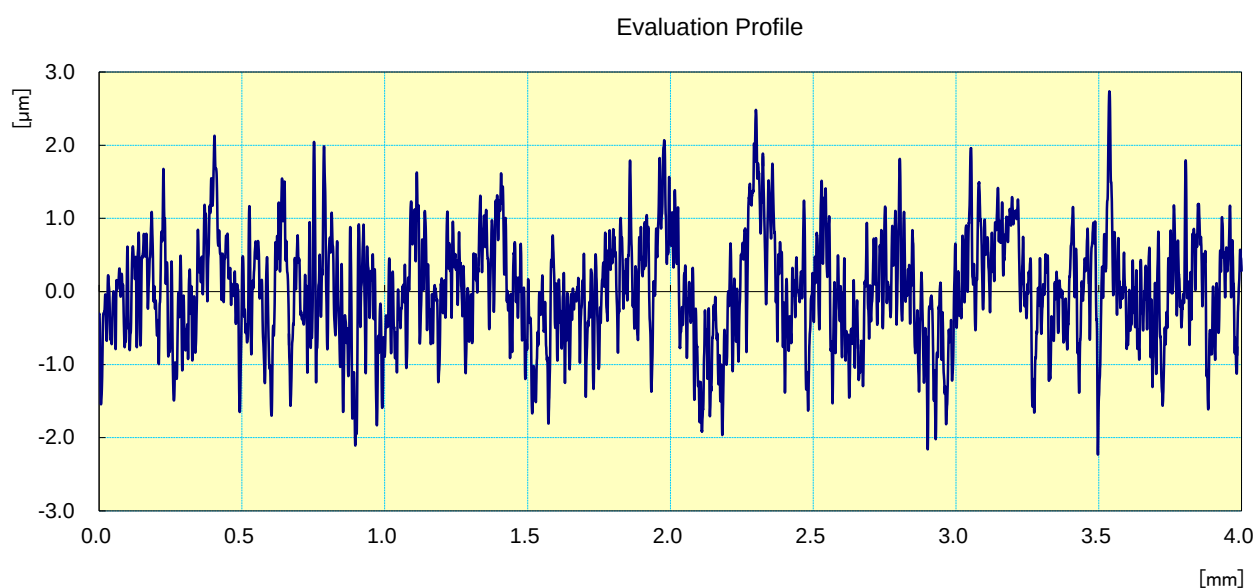
Профиль шероховатости  
Результаты измерения

|             |          |         |       |
|-------------|----------|---------|-------|
| Standard    | ISO 1997 | N       | 5     |
| Profile     | R        | Cut-Off | 0.8mm |
| $\lambda_s$ | 2.5μm    | Filter  | GAUSS |
|             |          |         |       |
| Ra          | 0.447 μm |         |       |
| Rq          | 0.559 μm |         |       |
| Rz          | 3.083 μm |         |       |
|             |          |         |       |

Материал образца – алюминий



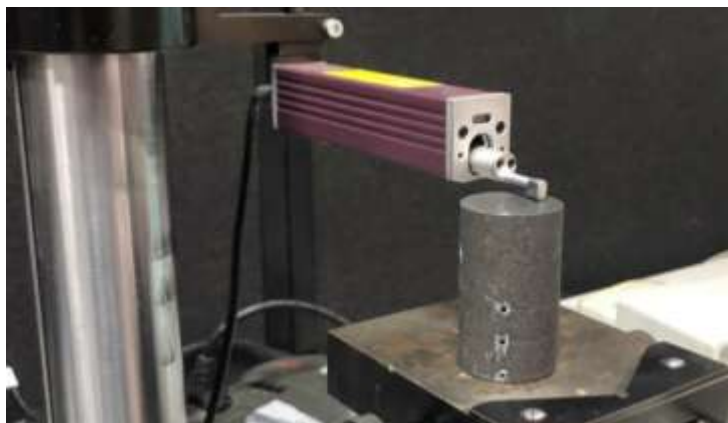
Измерение  
шероховатости образца  
на профилографе



Профиль шероховатости  
Результаты измерения

|             |          |         |       |
|-------------|----------|---------|-------|
| Standard    | ISO 1997 | N       | 5     |
| Profile     | R        | Cut-Off | 0.8mm |
| $\lambda_s$ | 2.5μm    | Filter  | GAUSS |
|             |          |         |       |
| Ra          | 0.590 μm |         |       |
| Rq          | 0.744 μm |         |       |
| Rz          | 4.220 μm |         |       |
|             |          |         |       |

Материал образца – графит



Измерение  
шероховатости образца  
на профилографе

Evaluation Profile



Профиль шероховатости

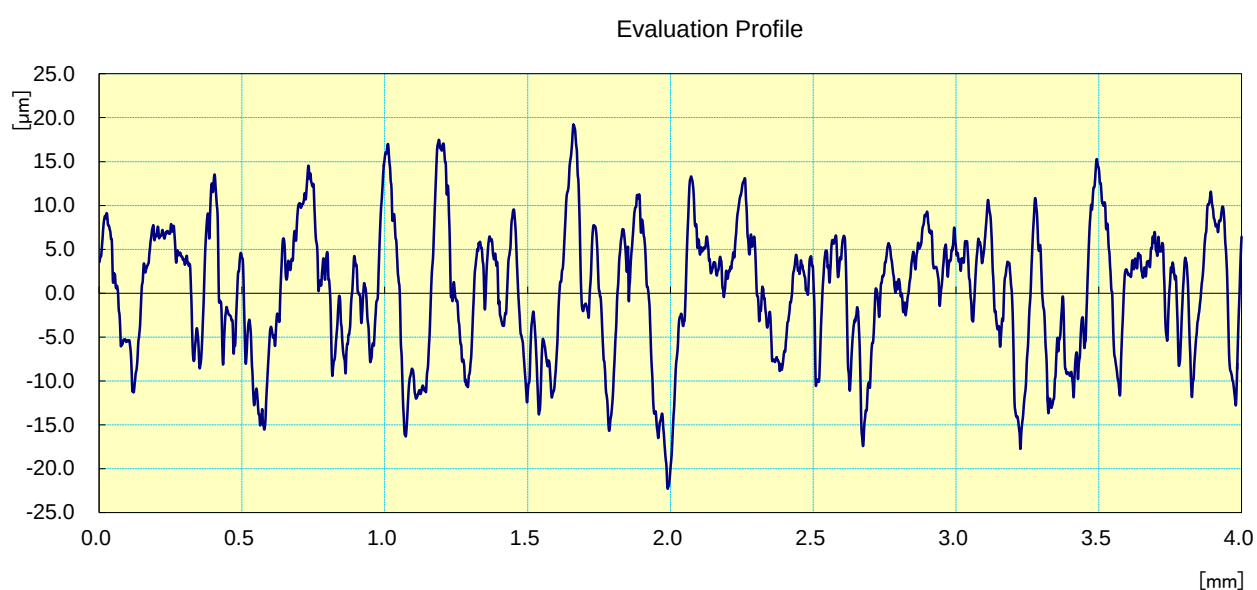
Результаты измерения

|             |                |         |       |
|-------------|----------------|---------|-------|
| Standard    | ISO 1997       | N       | 5     |
| Profile     | R              | Cut-Off | 0.8mm |
| $\lambda_s$ | 2.5 $\mu$ m    | Filter  | GAUSS |
|             |                |         |       |
| Ra          | 1.615 $\mu$ m  |         |       |
| Rq          | 2.821 $\mu$ m  |         |       |
| Rz          | 16.821 $\mu$ m |         |       |
|             |                |         |       |

Материал образца –  $\text{Al}_2\text{O}_3$



Измерение  
шероховатости образца  
на профилографе



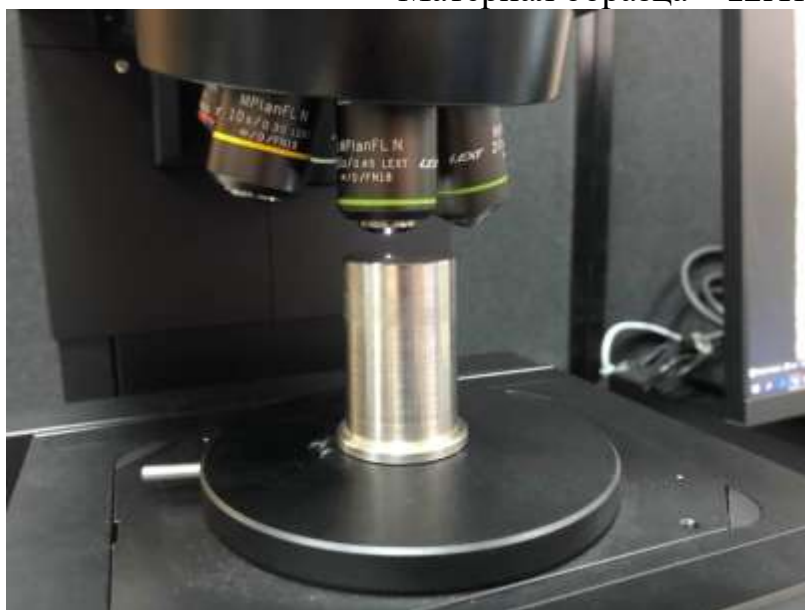
Профиль шероховатости

Результаты измерения

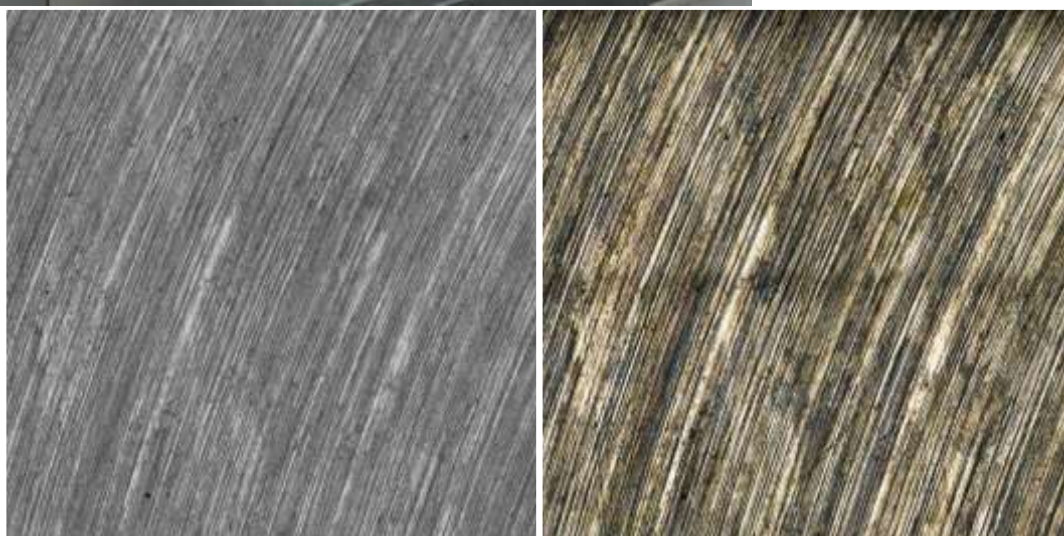
|             |                      |         |       |
|-------------|----------------------|---------|-------|
| Standard    | ISO 1997             | N       | 5     |
| Profile     | R                    | Cut-Off | 0.8mm |
| $\lambda_s$ | 2.5 $\mu\text{m}$    | Filter  | GAUSS |
| Ra          | 6.192 $\mu\text{m}$  |         |       |
| Rq          | 7.426 $\mu\text{m}$  |         |       |
| Rz          | 33.294 $\mu\text{m}$ |         |       |
|             |                      |         |       |

## Результаты измерений на трехмерном измерительном лазерном микроскопе

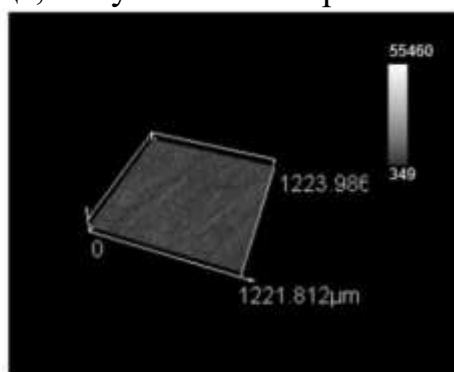
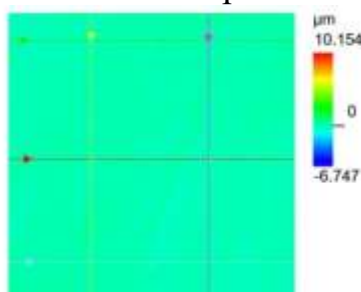
Материал образца – 12Х10Н8Т



Измерение  
шероховатости образца  
на лазерном  
микроскопе



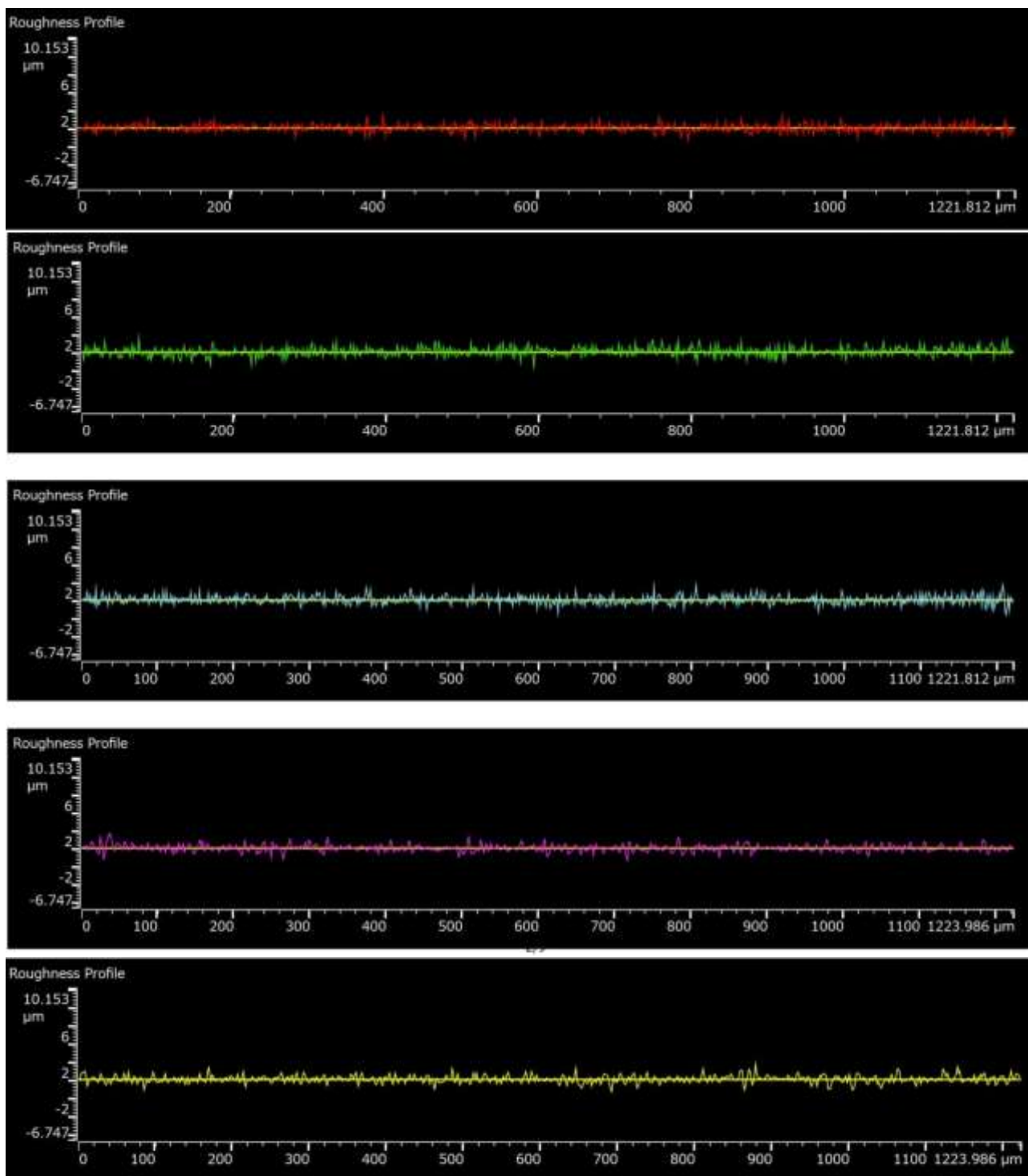
Изображения образца, полученные лазерным микроскопом



| [Roughness Settings Information]         |    |   |    |
|------------------------------------------|----|---|----|
| Cutoff:                                  | Ac | — | µm |
|                                          | As | — | µm |
|                                          | Af | — | µm |
| Filter: Gaussian filter                  |    |   |    |
| Analysis parameter: Roughness parameters |    |   |    |

Направление линий профиля для измерения шероховатости  
Профили шероховатости

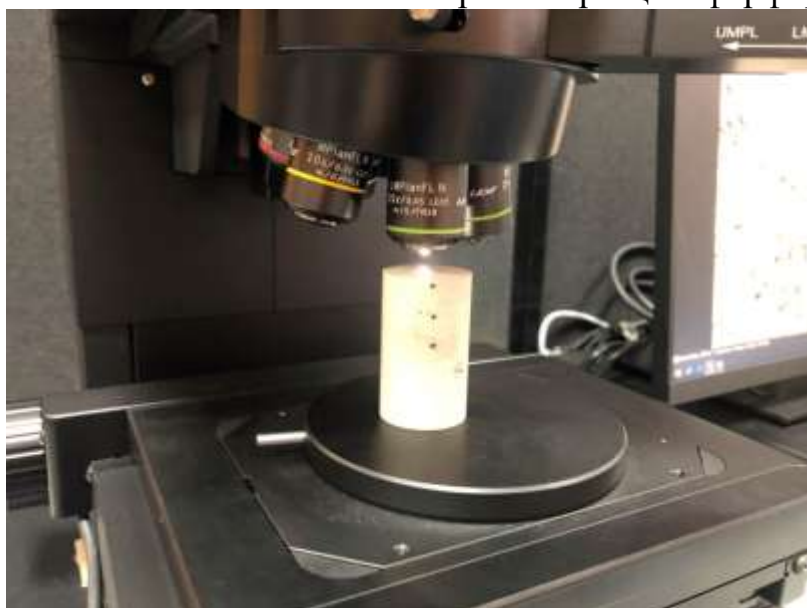




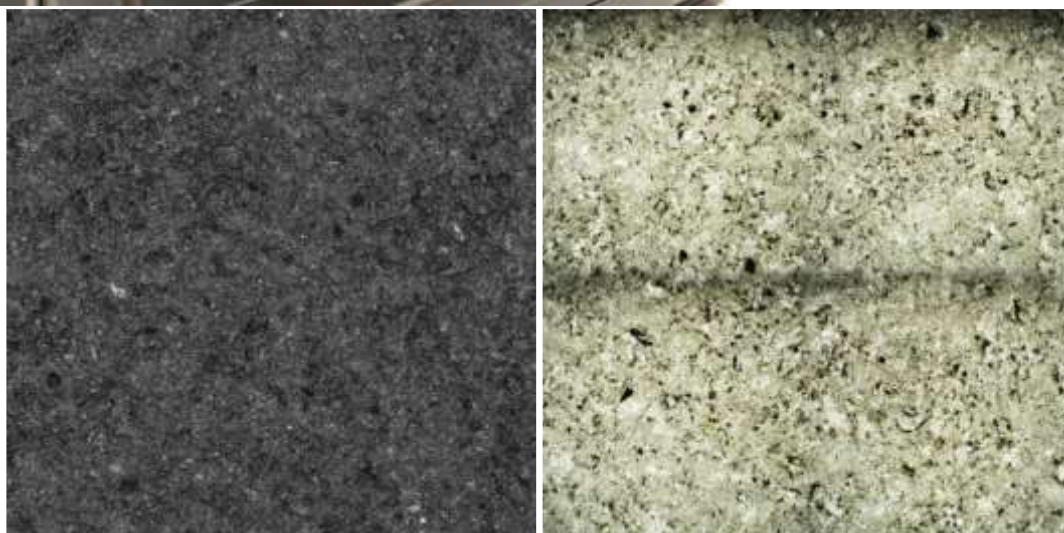
## Результаты измерения

| No. | Result | Rp[μm] | Rv[μm] | Rz[μm] | Rc[μm] | Rt[μm] | Ra[μm] | Rq[μm] | Rsk   | Rku   | Rsm[μm] | RAΔq[°] | Rōc[μm] | Rmr[%] | Rzjis[μm] |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|---------|---------|---------|--------|-----------|
| 1   |        | 1.489  | 1.380  | 2.869  | 0.831  | 2.869  | 0.266  | 0.352  | 0.292 | 4.201 | 4.282   | 28.755  | 0.527   | 100.00 | 2.559     |
| 2   |        | 1.622  | 1.623  | 3.245  | 0.975  | 3.245  | 0.319  | 0.411  | 0.279 | 3.587 | 4.031   | 34.300  | 0.650   | 100.00 | 2.856     |
| 3   |        | 1.785  | 1.561  | 3.346  | 0.937  | 3.346  | 0.304  | 0.400  | 0.475 | 4.047 | 3.942   | 33.310  | 0.607   | 100.00 | 2.969     |
| 4   |        | 1.632  | 1.389  | 3.020  | 0.913  | 3.020  | 0.281  | 0.373  | 0.336 | 4.215 | 8.507   | 17.482  | 0.540   | 100.00 | 2.667     |
| 5   |        | 1.640  | 1.377  | 3.017  | 0.976  | 3.017  | 0.296  | 0.388  | 0.231 | 3.978 | 8.754   | 17.636  | 0.592   | 100.00 | 2.697     |

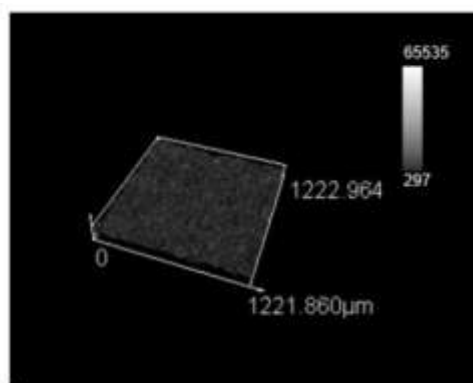
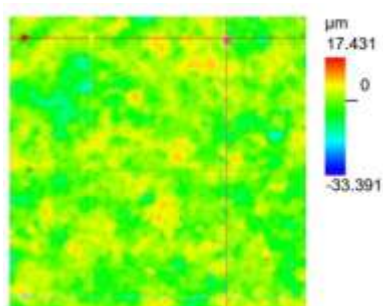
Материал образца – фарфор



Измерение  
шероховатости образца  
на лазерном  
микроскопе



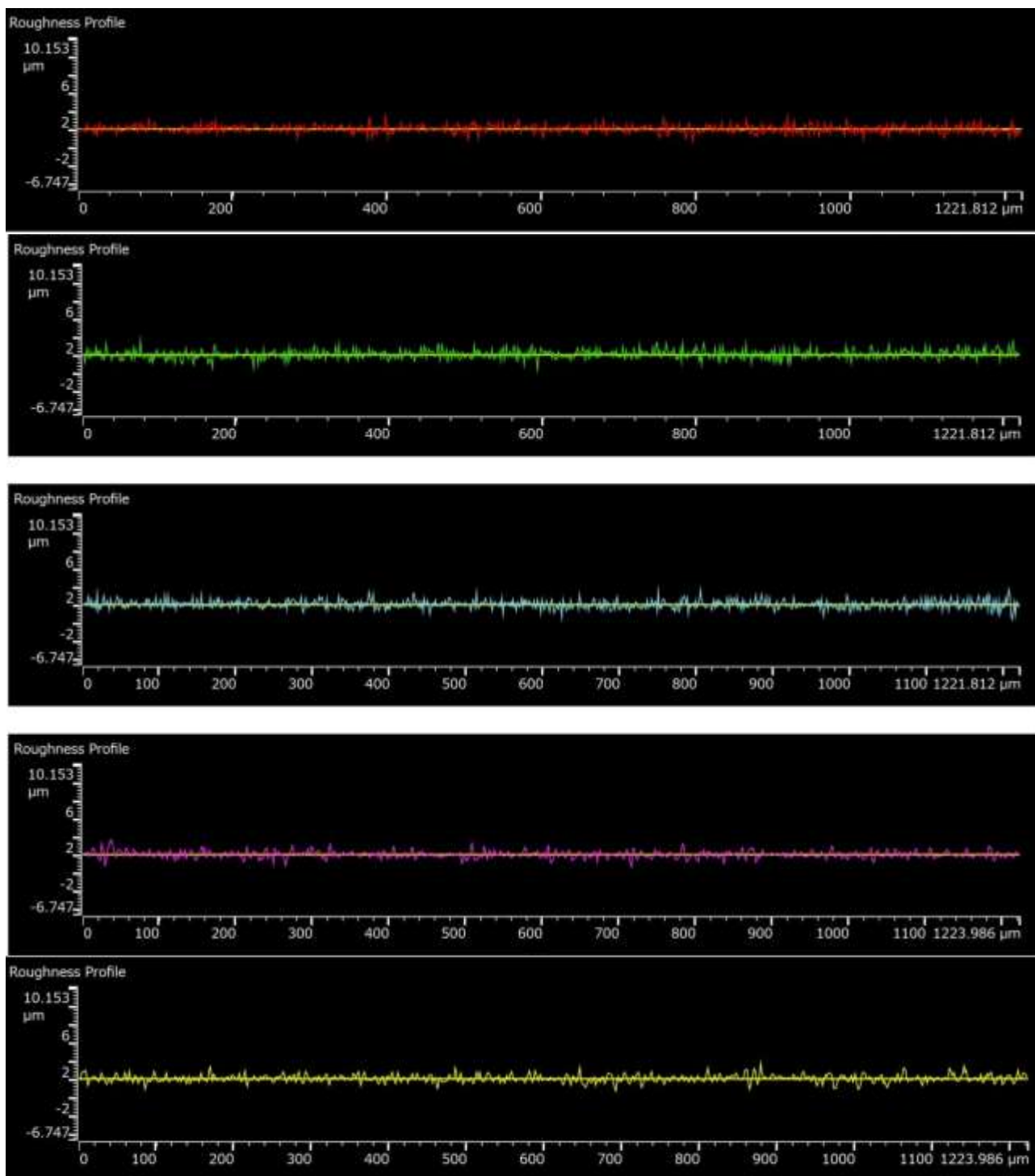
Изображения образца, полученные лазерным микроскопом



| [Roughness Settings Information]         |             |   |               |
|------------------------------------------|-------------|---|---------------|
| Cutoff:                                  | $\lambda_c$ | — | $\mu\text{m}$ |
|                                          | $\lambda_s$ | — | $\mu\text{m}$ |
|                                          | $\lambda_f$ | — | $\mu\text{m}$ |
| Filter: Gaussian filter                  |             |   |               |
| Analysis parameter: Roughness parameters |             |   |               |

Направление линий профиля для измерения шероховатости  
Профили шероховатости





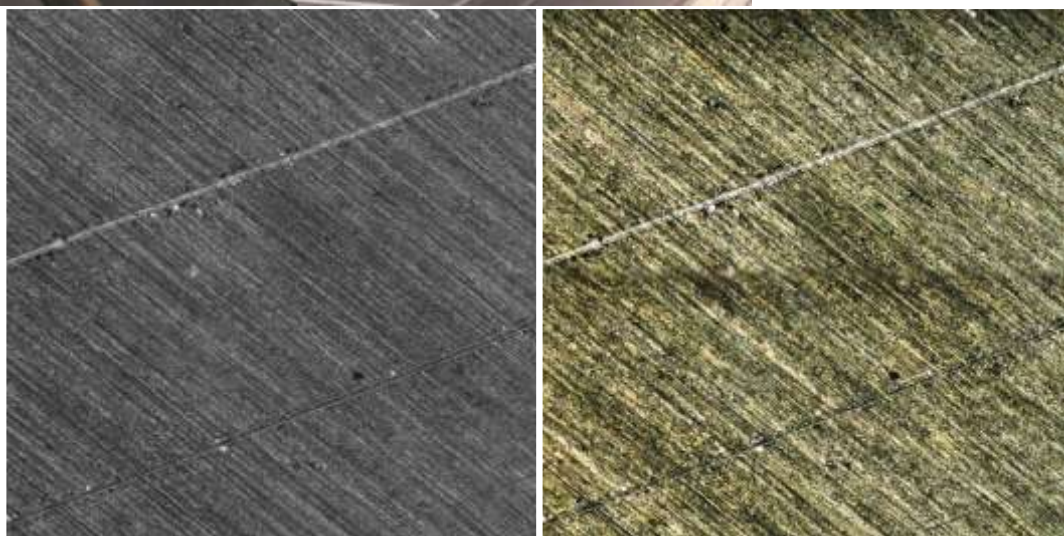
## Результаты измерения

| No. | Result | Rp[μm] | Rv[μm] | Rz[μm] | Rc[μm] | Rt[μm] | Ra[μm] | Rq[μm] | Rsk    | Rku   | Rsm[μm] | RDq[°] | Rōc[μm] | Rmr[%] | Rzjis[μm] |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|--------|---------|--------|-----------|
| 1   |        | 8.337  | 10.873 | 19.210 | 4.950  | 19.210 | 3.225  | 3.965  | -0.455 | 2.585 | 62.360  | 41.237 | 7.092   | 100.00 | 12.737    |
| 2   |        | 6.182  | 7.273  | 13.455 | 3.533  | 13.455 | 1.862  | 2.346  | -0.100 | 2.787 | 23.834  | 45.002 | 4.450   | 100.00 | 9.868     |
| 3   |        | 9.329  | 11.876 | 21.206 | 6.723  | 21.206 | 3.615  | 4.424  | -0.390 | 2.428 | 57.078  | 46.221 | 8.430   | 100.00 | 16.692    |
| 4   |        | 7.426  | 13.679 | 21.106 | 4.766  | 21.106 | 2.472  | 3.154  | -0.646 | 3.753 | 31.304  | 46.502 | 5.040   | 100.00 | 14.970    |
| 5   |        | 9.861  | 11.280 | 21.141 | 6.679  | 21.141 | 3.438  | 4.163  | -0.385 | 2.472 | 46.540  | 49.104 | 7.732   | 100.00 | 17.805    |

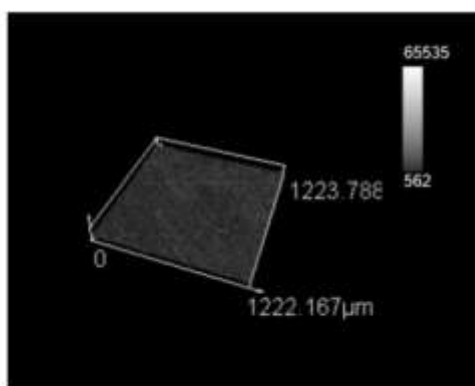
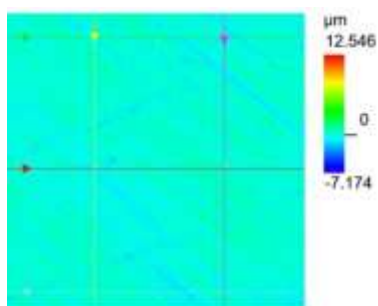
Материал образца – Мо



Измерение  
шероховатости образца  
на лазерном  
микроскопе

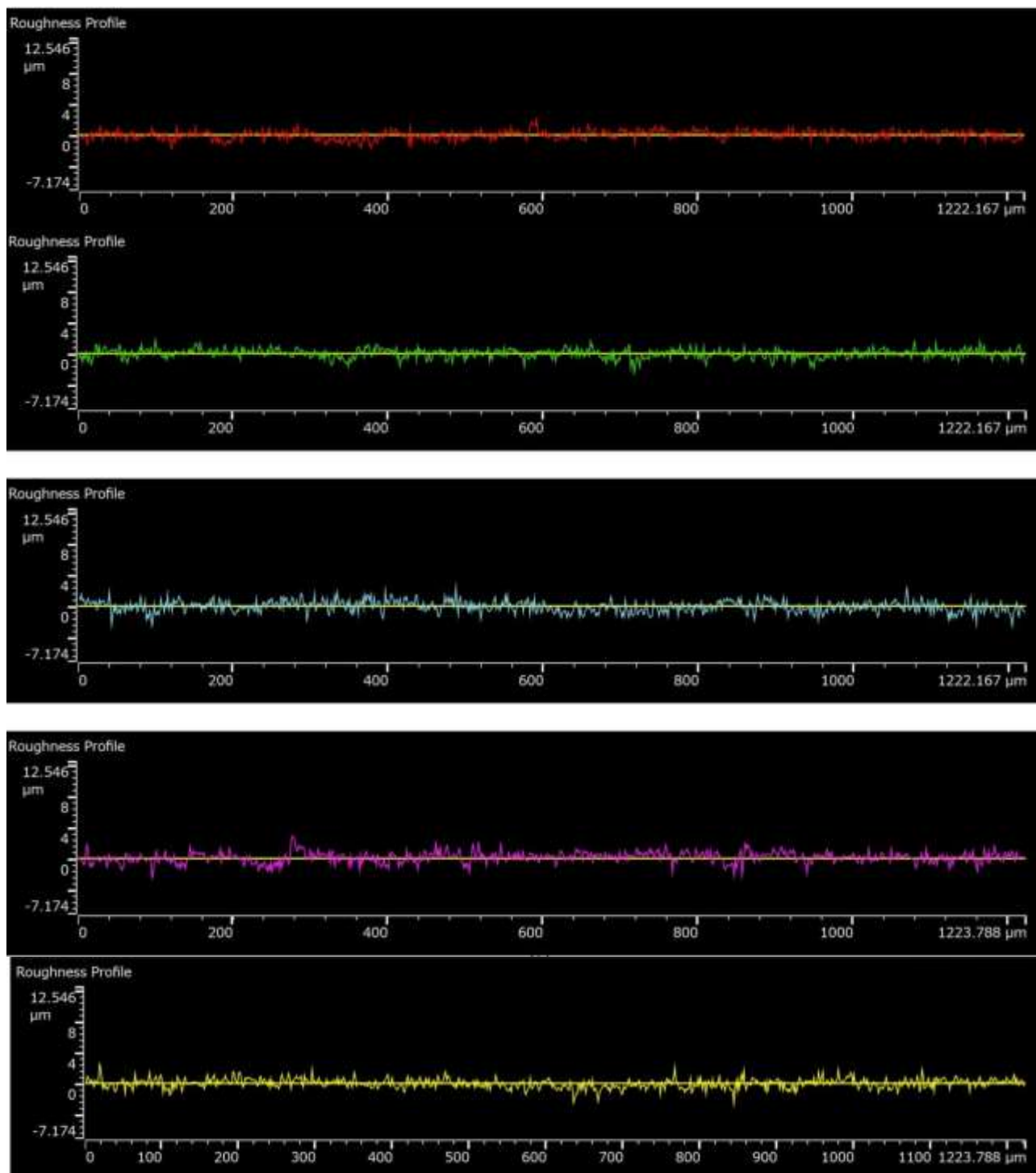


Изображения образца, полученные лазерным микроскопом



[Roughness Settings Information]  
Cutoff:  $\lambda_c$  —  $\mu\text{m}$   
 $\lambda_s$  —  $\mu\text{m}$   
 $\lambda_f$  —  $\mu\text{m}$   
Filter: Gaussian filter  
Analysis parameter: Roughness parameters

Направление линий профиля для измерения шероховатости  
Профили шероховатости

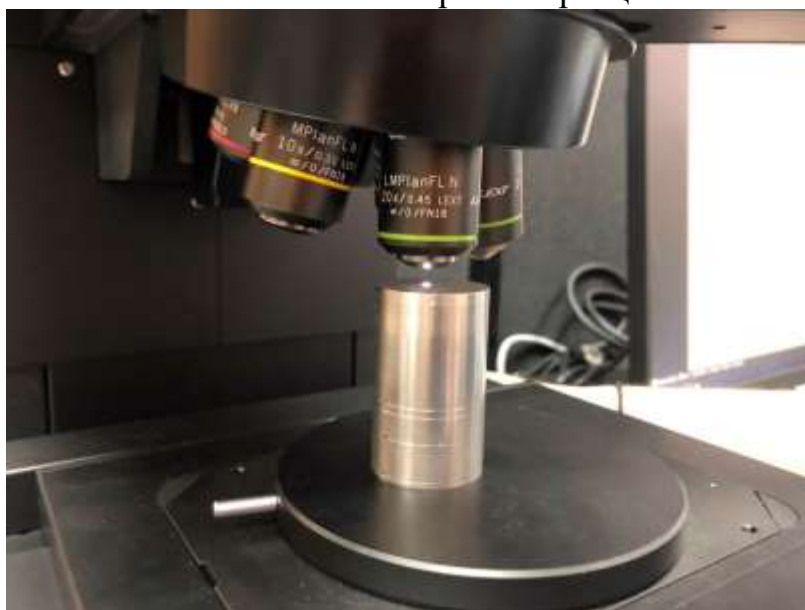


## Результаты измерения

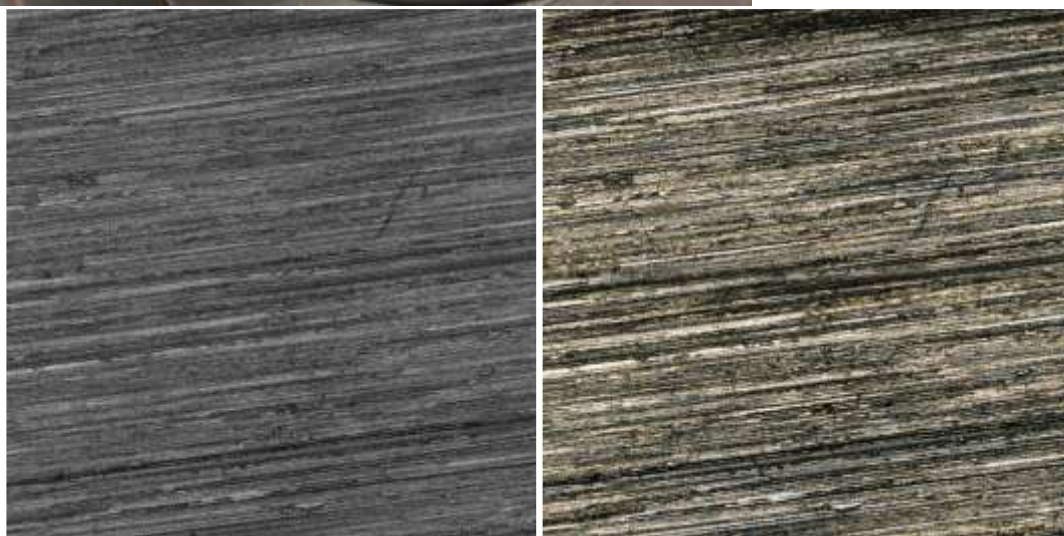
| No. | Result | Rp[μm] | Rv[μm] | Rz[μm] | Rc[μm] | Rt[μm] | Ra[μm] | Rq[μm] | Rsk    | Rku   | Rsm[μm] | RΔq[°] | RΔc[μm] | Rmr[%]  | Rzjis[μm] |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|--------|---------|---------|-----------|
| 1   |        | 1.975  | 1.619  | 3.595  | 1.061  | 3.595  | 0.386  | 0.495  | 0.044  | 3.538 | 7.556   | 27.066 | 0.820   | 100.000 | 3.214     |
| 2   |        | 1.749  | 2.427  | 4.176  | 1.159  | 4.176  | 0.421  | 0.546  | -0.291 | 3.678 | 6.841   | 29.648 | 0.850   | 100.000 | 3.517     |
| 3   |        | 2.567  | 2.596  | 5.163  | 1.450  | 5.163  | 0.504  | 0.644  | -0.006 | 3.468 | 6.719   | 35.729 | 1.072   | 100.000 | 4.482     |
| 4   |        | 2.887  | 2.454  | 5.341  | 1.399  | 5.341  | 0.468  | 0.626  | 0.149  | 4.647 | 7.560   | 32.100 | 0.920   | 100.000 | 4.236     |
| 5   |        | 2.434  | 2.502  | 4.935  | 1.391  | 4.935  | 0.440  | 0.566  | -0.073 | 3.915 | 7.663   | 31.093 | 0.884   | 100.000 | 4.152     |



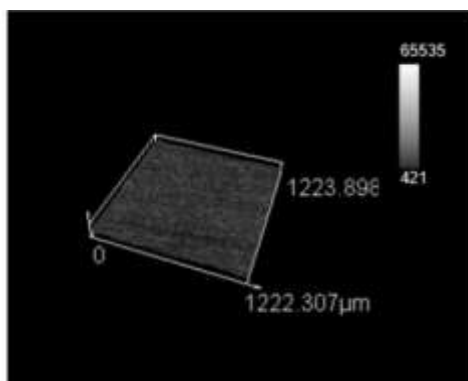
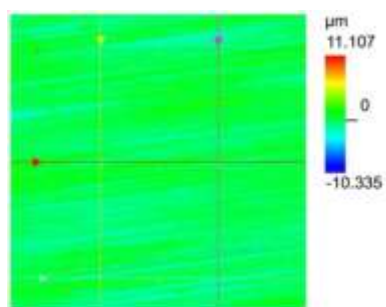
Материал образца - алюминий



Измерение  
шероховатости образца  
на лазерном  
микроскопе

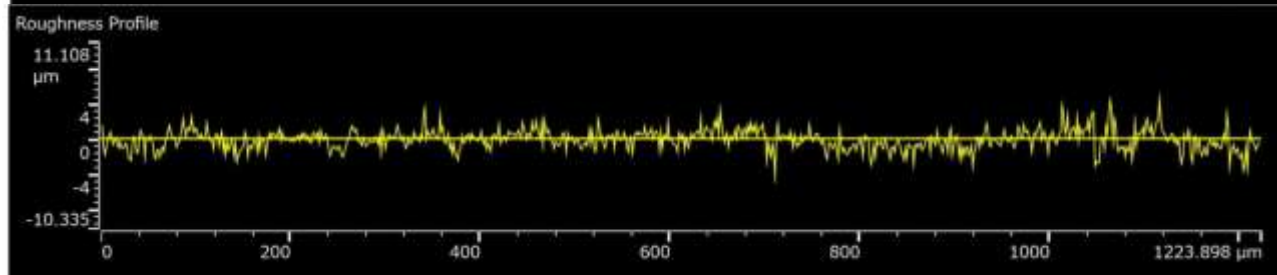
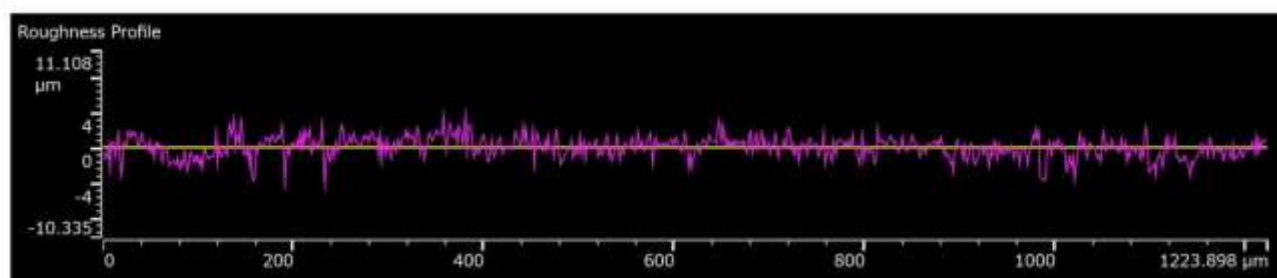
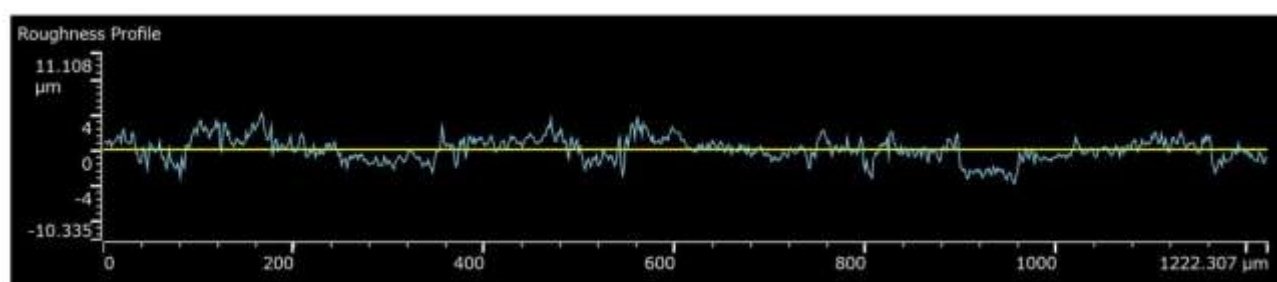
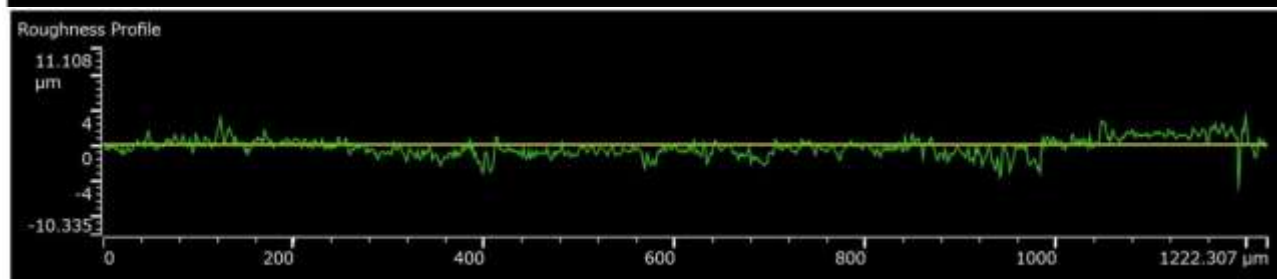
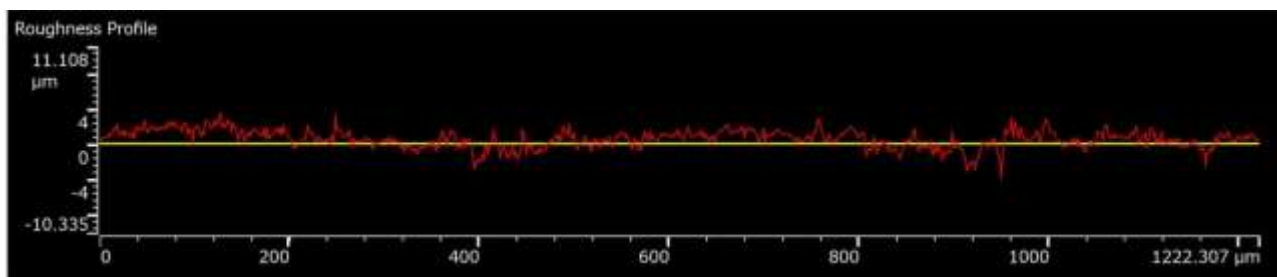


Изображения образца, полученные лазерным микроскопом



| [Roughness Settings Information]         |    |   |    |
|------------------------------------------|----|---|----|
| Cutoff:                                  | Ac | — | μm |
|                                          | As | — | μm |
|                                          | Al | — | μm |
| Filter: Gaussian filter                  |    |   |    |
| Analysis parameter: Roughness parameters |    |   |    |

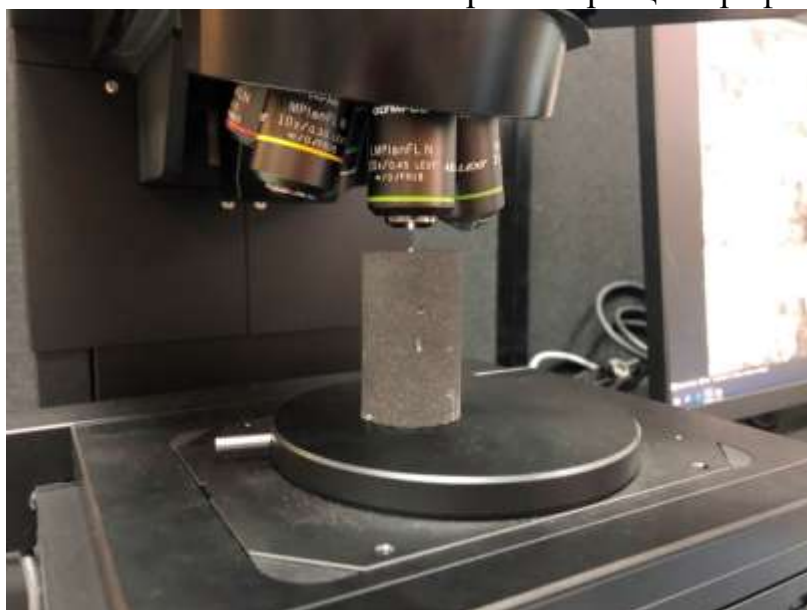
. Направление линий профиля для измерения шероховатости  
Профили шероховатости



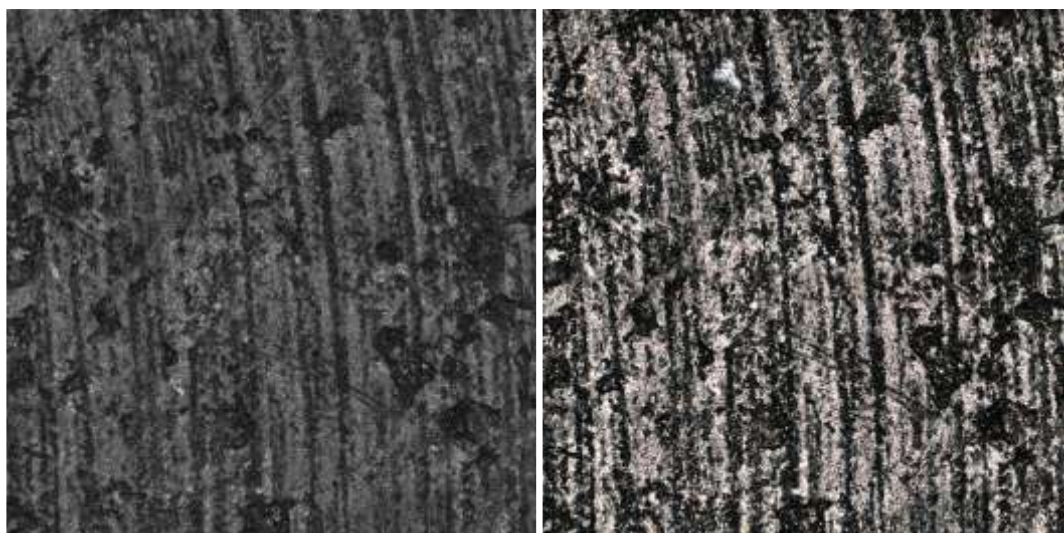
## Результаты измерения

| No. | Result | Rp[μm] | Rv[μm] | Rz[μm] | Rc[μm] | Rt[μm] | Ra[μm] | Rq[μm] | Rsk    | Rku   | Rsm[μm] | RAΔq[°] | Rōc[μm] | Rmr[%]  | Rzjis[μm] |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 1   |        | 2.540  | 4.329  | 6.869  | 1.979  | 6.869  | 0.749  | 0.957  | -0.645 | 3.870 | 23.766  | 26.027  | 1.635   | 100.00% | 5.790     |
| 2   |        | 3.590  | 4.517  | 8.107  | 1.884  | 8.107  | 0.774  | 0.991  | -0.122 | 3.491 | 22.391  | 27.746  | 1.627   | 100.00% | 6.150     |
| 3   |        | 3.722  | 4.670  | 8.392  | 2.264  | 8.392  | 1.024  | 1.289  | -0.226 | 2.888 | 22.345  | 29.433  | 2.118   | 100.00% | 6.927     |
| 4   |        | 3.604  | 4.489  | 8.093  | 2.471  | 8.093  | 0.846  | 1.105  | -0.409 | 3.884 | 9.196   | 46.486  | 1.758   | 100.00% | 7.415     |
| 5   |        | 4.639  | 4.157  | 8.795  | 2.358  | 8.795  | 0.830  | 1.088  | -0.030 | 4.065 | 10.313  | 45.889  | 1.688   | 100.00% | 7.700     |

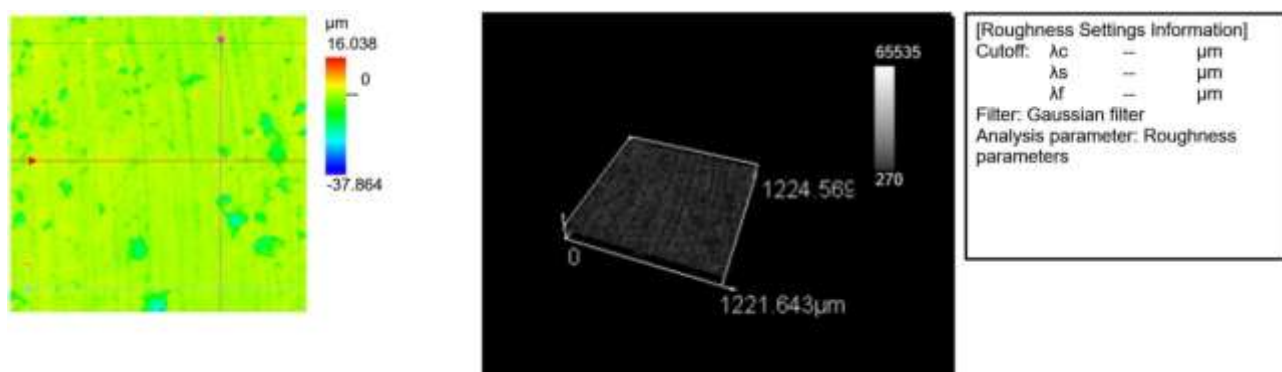
Материал образца - графит



Измерение  
шероховатости образца  
на лазерном  
микроскопе

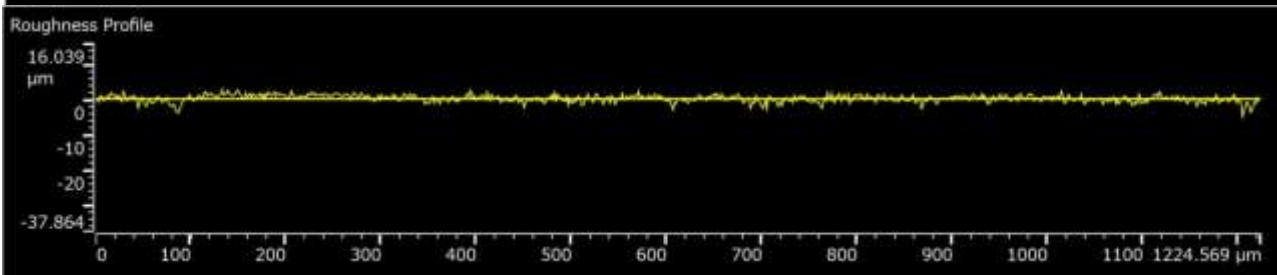
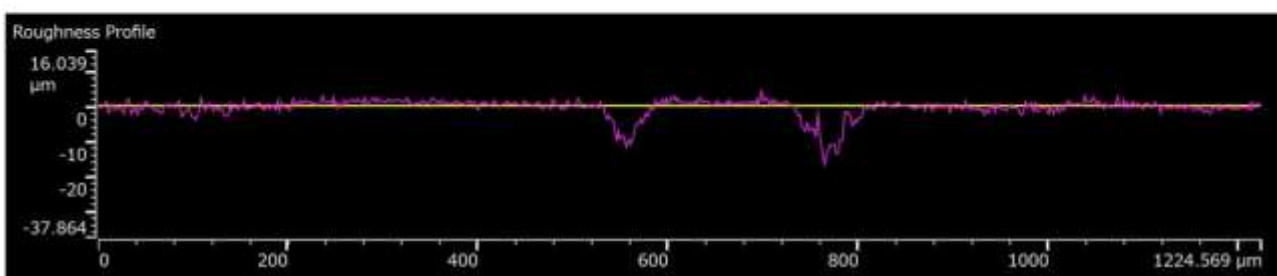
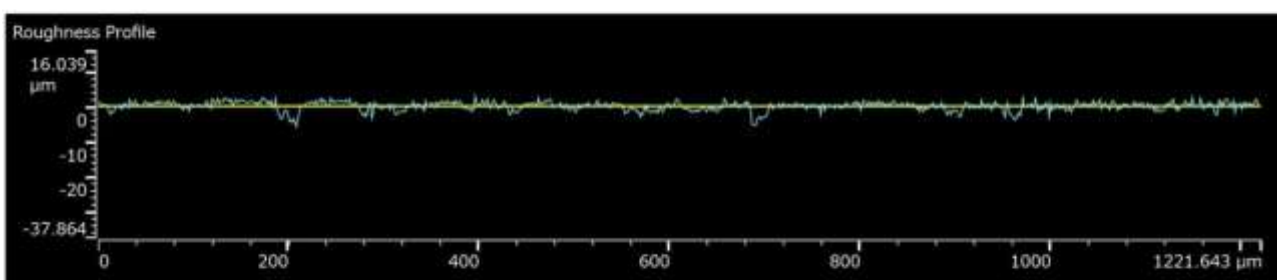
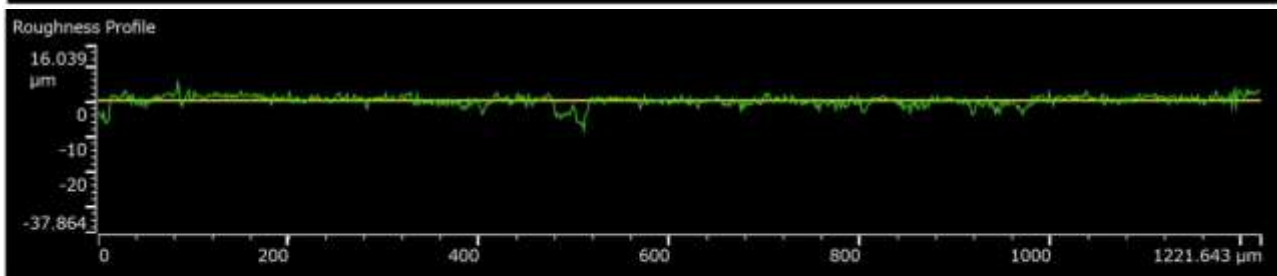
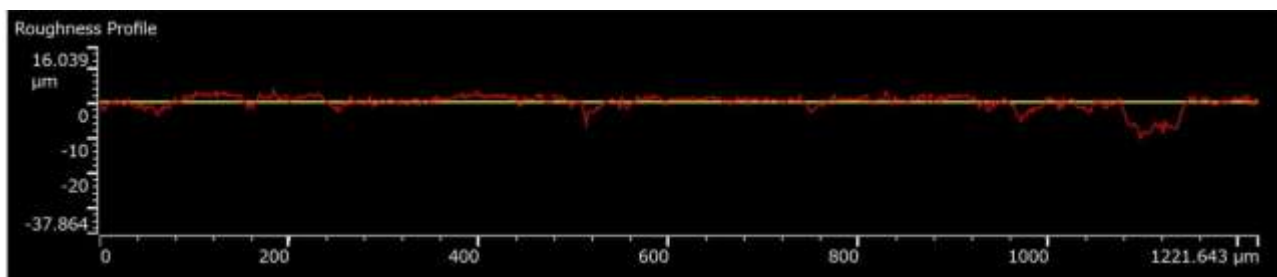


Изображения образца, полученные лазерным микроскопом



Направление линий профиля для измерения шероховатости  
Профили шероховатости

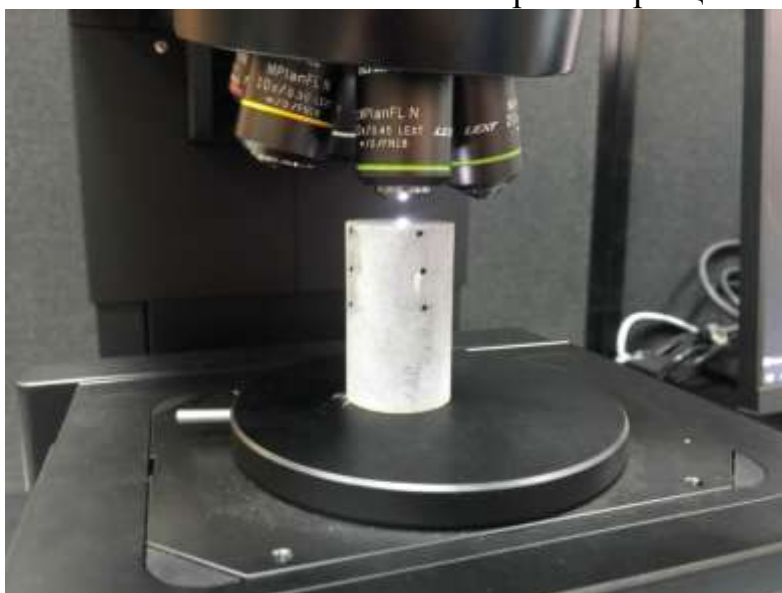




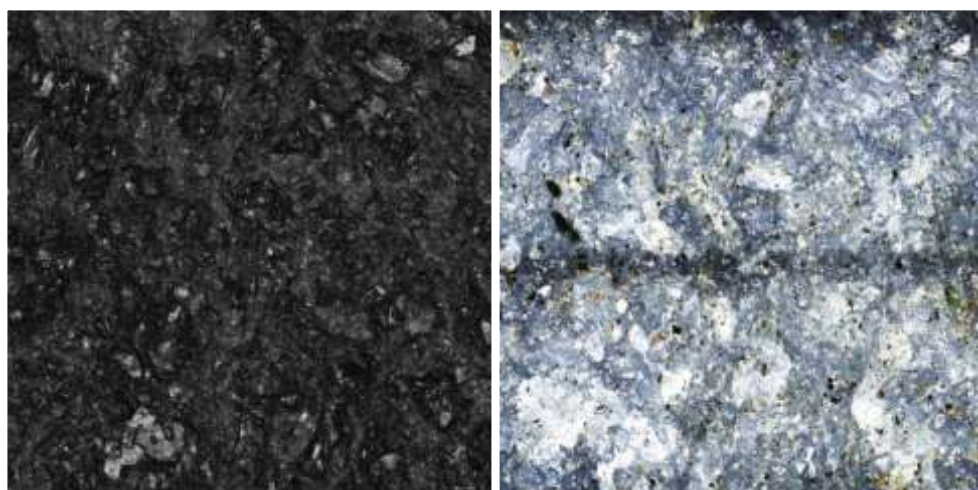
## Результаты измерения

| No. | Result | Rp[μm] | Rv[μm] | Rz[μm] | Rc[μm] | Rt[μm] | Ra[μm] | Rq[μm] | Rsk    | Rku    | Rsm[μm] | RAΔq[°] | Rōc[μm] | Rmr[%] | Rzjis[μm] |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|-----------|
| 1   |        | 3.508  | 9.616  | 13.124 | 2.984  | 13.124 | 1.414  | 1.972  | -1.843 | 7.102  | 26.620  | 37.011  | 2.273   | 100.00 | 7.500     |
| 2   |        | 5.202  | 8.475  | 13.677 | 2.635  | 13.677 | 1.078  | 1.478  | -1.312 | 6.339  | 11.821  | 45.150  | 2.011   | 100.00 | 8.993     |
| 3   |        | 2.796  | 5.998  | 8.794  | 2.294  | 8.794  | 0.922  | 1.243  | -1.249 | 5.668  | 12.009  | 40.798  | 1.805   | 100.00 | 7.314     |
| 4   |        | 5.352  | 16.201 | 21.553 | 3.305  | 21.553 | 1.538  | 2.581  | -2.949 | 13.218 | 23.946  | 42.459  | 2.063   | 100.00 | 11.311    |
| 5   |        | 2.436  | 5.426  | 7.862  | 1.930  | 7.862  | 0.684  | 0.910  | -0.990 | 5.491  | 9.007   | 37.721  | 1.445   | 100.00 | 6.042     |

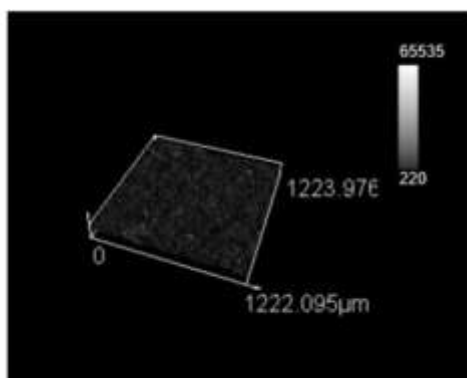
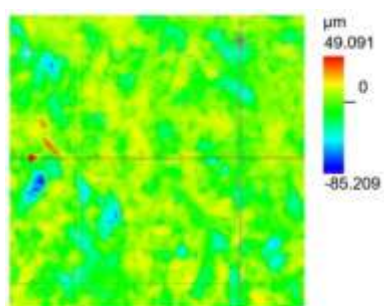
Материал образца -  $\text{Al}_2\text{O}_3$



Измерение  
шероховатости образца  
на лазерном  
микроскопе



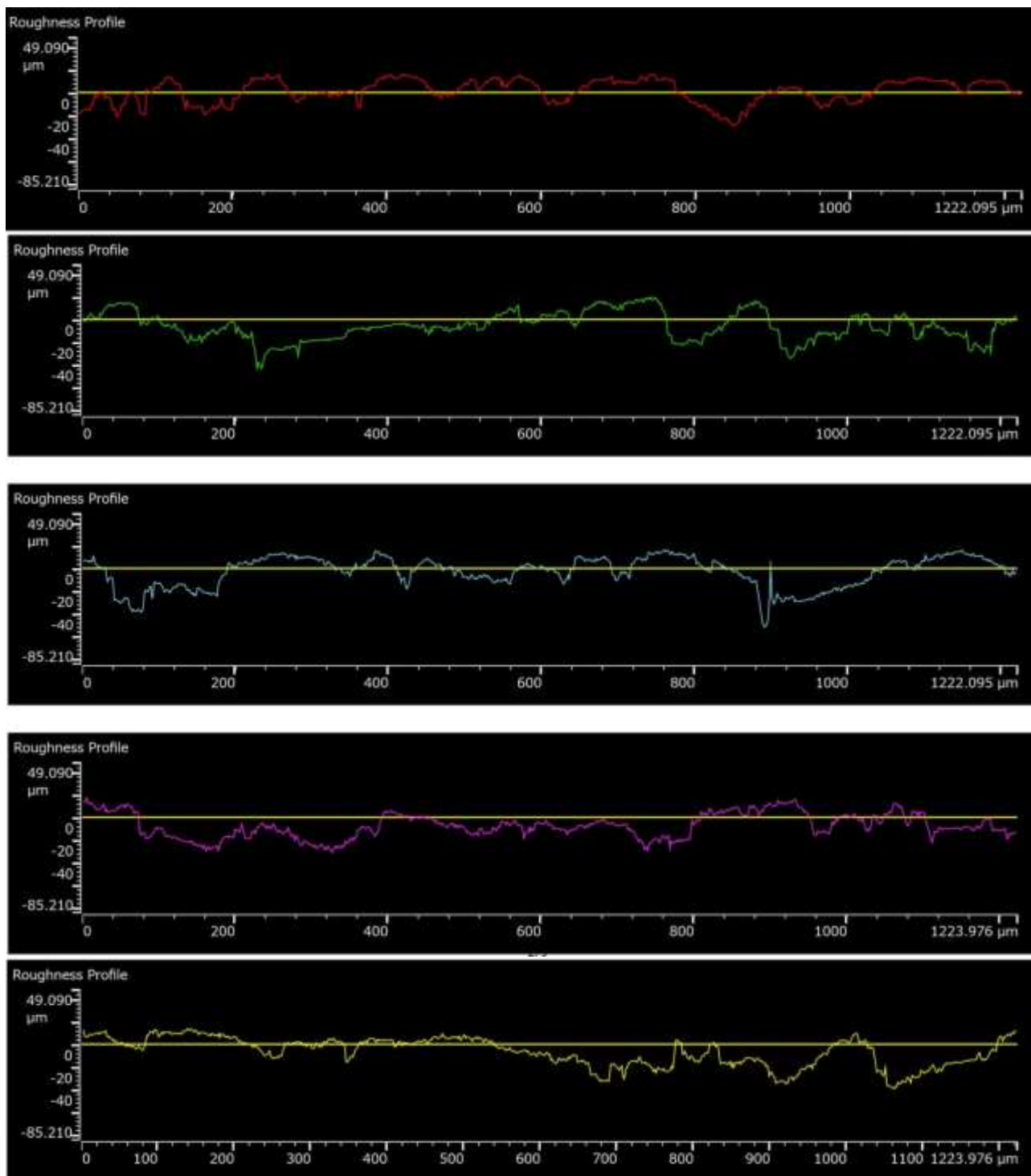
Изображения образца, полученные лазерным микроскопом



| [Roughness Settings Information]         |    |   |    |
|------------------------------------------|----|---|----|
| Cutoff:                                  | Ac | — | µm |
|                                          | As | — | µm |
|                                          | Af | — | µm |
| Filter: Gaussian filter                  |    |   |    |
| Analysis parameter: Roughness parameters |    |   |    |

Направление линий профиля для измерения шероховатости  
Профили шероховатости

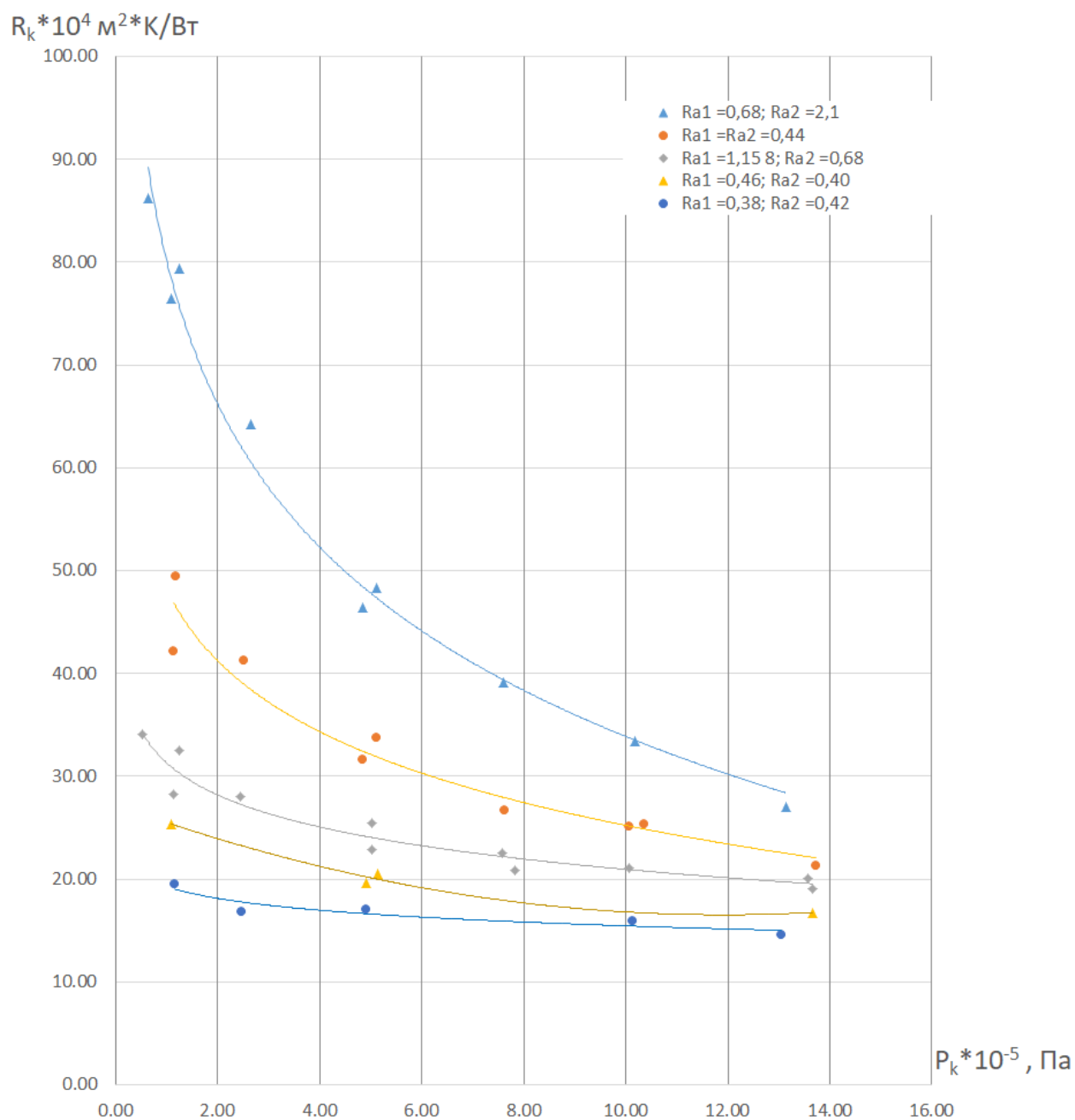




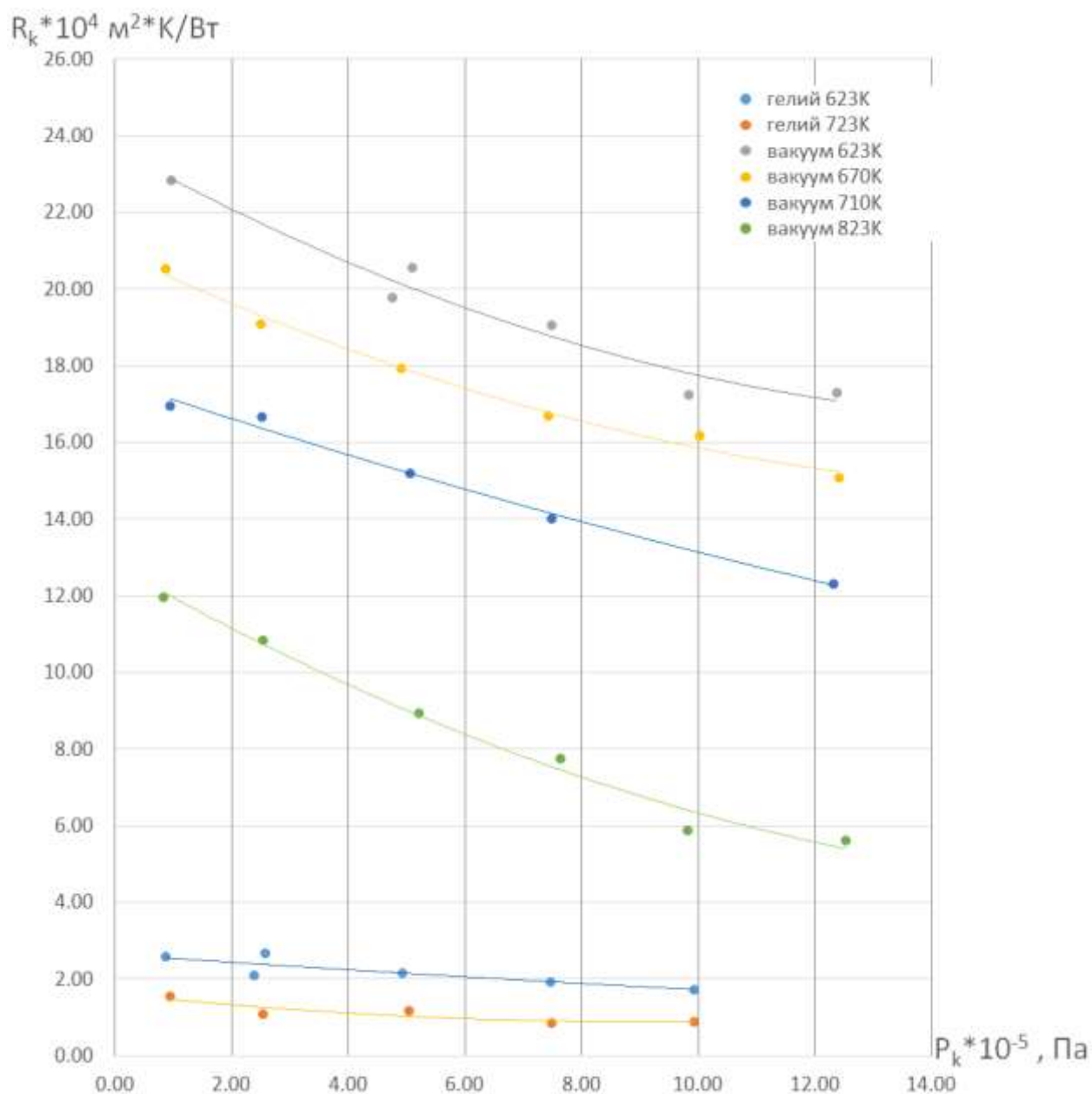
## Результаты измерения

| No. | Result | Rp[μm] | Rv[μm] | Rz[μm] | Rc[μm] | Rt[μm] | Ra[μm] | Rq[μm] | Rsk    | Rku   | Rsm[μm] | RAΔq[°] | Rōc[μm] | Rmr[%] | Rzjis[μm] |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|---------|---------|--------|-----------|
| 1   |        | 16.478 | 31.437 | 47.915 | 21.102 | 47.915 | 8.131  | 9.936  | -0.664 | 2.906 | 86.568  | 60.918  | 19.232  | 100.00 | 36.369    |
| 2   |        | 25.844 | 39.016 | 64.860 | 22.153 | 64.860 | 9.950  | 12.443 | -0.071 | 2.601 | 91.574  | 62.460  | 21.508  | 100.00 | 40.796    |
| 3   |        | 19.771 | 51.297 | 71.068 | 28.998 | 71.068 | 10.888 | 13.400 | -0.902 | 3.315 | 105.316 | 64.792  | 23.742  | 100.00 | 45.532    |
| 4   |        | 29.124 | 22.898 | 52.022 | 18.235 | 52.022 | 8.457  | 10.419 | 0.302  | 2.470 | 65.386  | 64.285  | 20.721  | 100.00 | 37.466    |
| 5   |        | 32.236 | 24.758 | 56.994 | 20.301 | 56.994 | 7.790  | 10.020 | 0.142  | 3.466 | 128.662 | 64.952  | 22.700  | 100.00 | 28.722    |

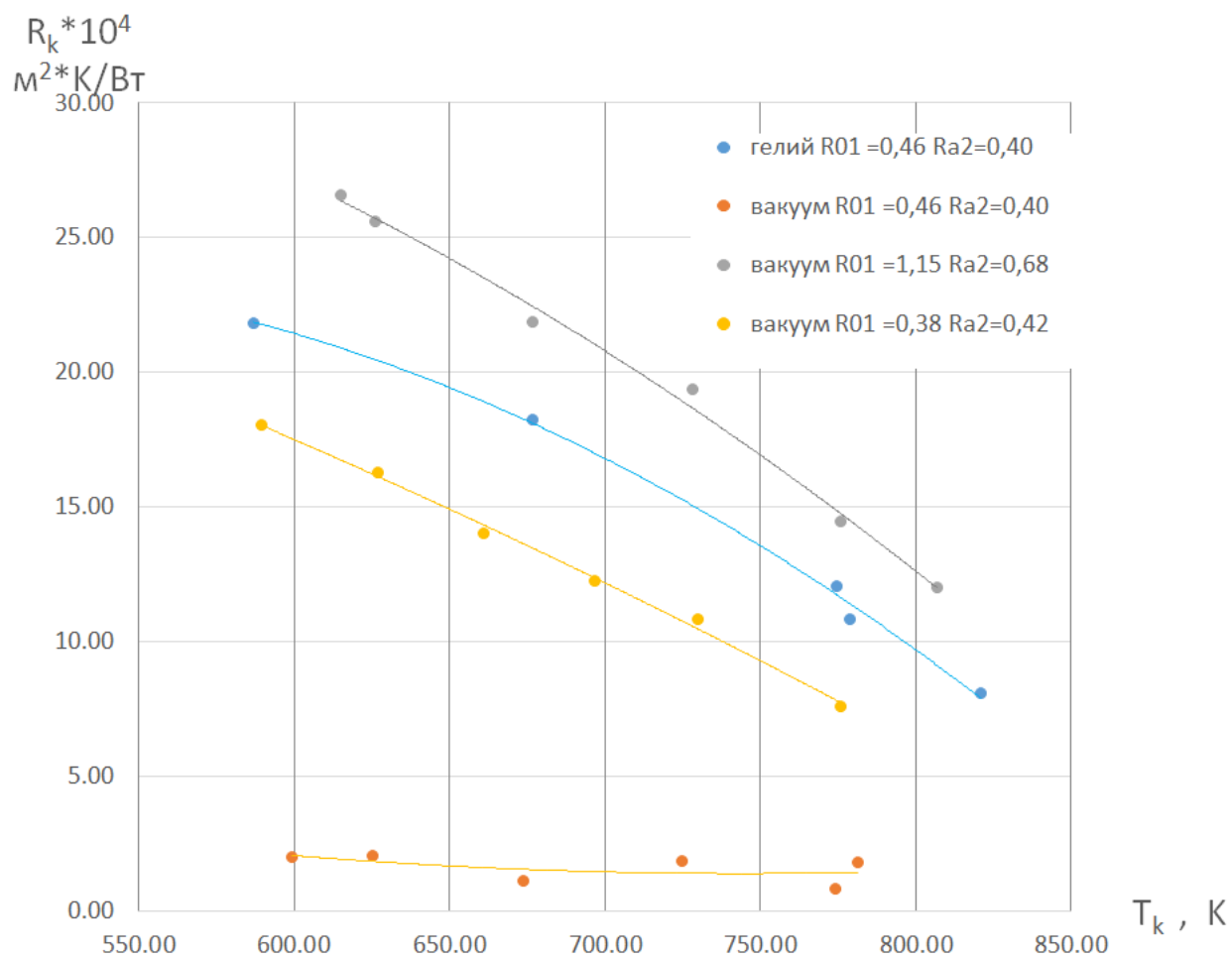
## Приложение 2. Результаты экспериментального определения КТС



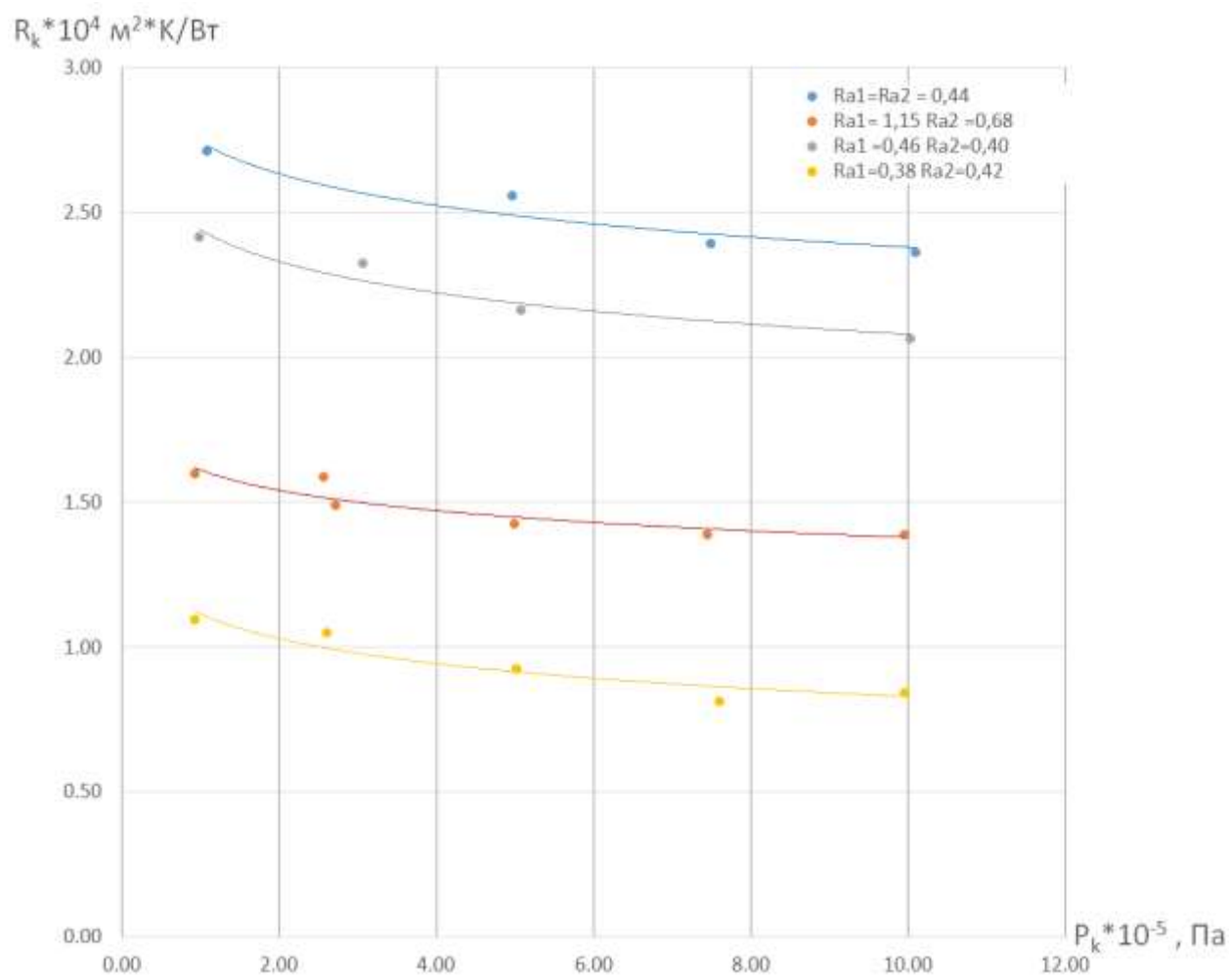
Влияние нагрузки на контактное термическое сопротивление для пары X18H9T// X18H9T различной геометрии в вакууме  $P_v = 0,133 \text{ Па}$  при  $T_k = 623 \text{ К}$



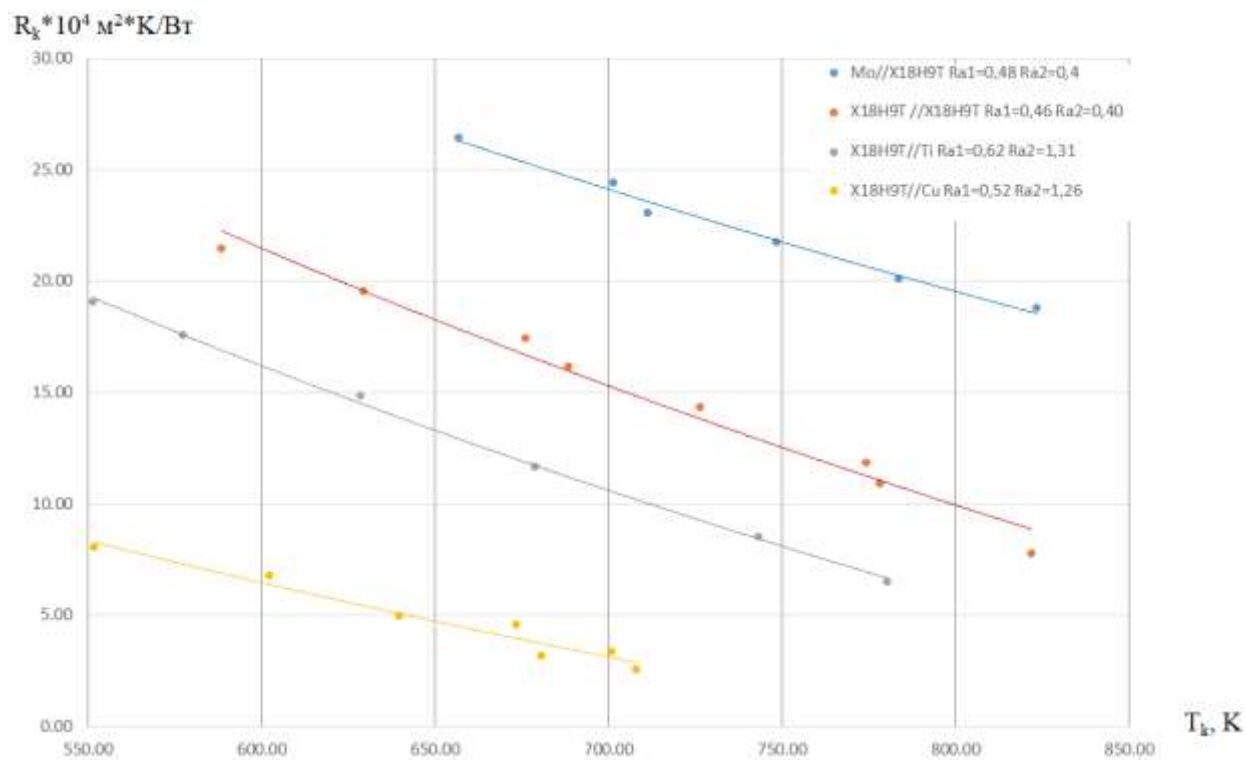
Зависимость контактного термического сопротивления от нагрузки для пары X18H9T// X18H9T  $R_{a1} = 0,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $R_{a2} = 0,40 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  для различных температур



Влияние температуры на  $R_k$  для пары X18H9T// X18H9T в вакууме  $/P = 0,133$  Па/ и в гелии при  $P_k = 5 \cdot 10^5$  Па



Влияние нагрузки на контактное термическое сопротивление для пары  
X18H9T//X18H9T различной геометрии в гелии  $P_k = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$   
при  $T_k = 673\text{K}$



Зависимость  $R_k$  от температуры для различных контактных пар при  $P_k=5 \cdot 10^5 \text{ Па}$

## Список сокращений и условных обозначений

В диссертации приведены следующие термины с соответствующими определениями:

КТС – контактное термическое сопротивление, возникающее при прохождении теплового потока между соприкасающимися поверхностями твердых тел, обусловленное дискретным характером фактического контакта.

ЖРД МТ - жидкостной ракетный двигатель малой тяги.

ТКЛР - термический коэффициент линейного расширения.

МКЭ - метод конечных элементов.

Номинальная площадь контакта – площадь контакта, ограниченная геометрическими поверхностями соприкасающихся тел.

Фактическая площадь контакта – площадь, образуемая за счёт деформаций микровыступов шероховатостей.

$\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентные напряжения

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - главные напряжения по осям

$\varepsilon_{\text{экв}}$  – эквивалентны деформации

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - главные деформации по осям

$\mu$  - коэффициент Пуассона

$\tau_{\text{max}}$  - максимальное касательное напряжение

$\gamma_{\text{max}}$  - максимальная деформация

$\varepsilon_t$  – температурные деформации

$\alpha$  - коэффициент теплового расширения тела

$T$  - температура в узле

$T_{\text{ref}}$  - исходная температура тела

$R_a$  - *среднеарифметическое отклонение профиля*

$R_z$  - *высота неровностей*

$R_{\text{max}}$  - *наибольшая высота неровностей профиля*

$S_m$  — *средний шаг неровностей профиля*

$S$  — средний шаг неровностей по вершинам  
 $t_p$  — относительная опорная длина профиля  
 $h_{cp}$  — средняя высота неровностей профиля  
 $P_{min}$  - минимальная вероятность  
 $P_{abs}$  - абсолютная величина выпадения величины  
 $T$  – общее количество точек  
 $L$  – базовая длина профиля  
 $R_K$  – контактное термическое сопротивление  
 $T_{ниж1}$  - температура холодной поверхности идеального контакта  
 $T_{ниж2}$  - - температура холодной поверхности реального контакта  
 $q$ – средняя величина плотности теплового потока  
 $\bar{\lambda}_m$  – приведенная теплопроводность  
 $\lambda_{мэкв}$  – эквивалентная теплопроводность  
 $P_K$  – контактное давление  
 $\sigma_B$  - предел прочности  
 $E$  - модуль упругости  
 $T_K$  - температура в зоне контакта  
 $T_{пл}$  - температура плавления материала  
 $\beta$  - коэффициент объёмного расширения  
 $\kappa$  - коэффициент формы  
 $K$  - коэффициент учитывающий изменение геометрических характеристик соприкасающихся тел  
 $A$  и  $m$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа контактирующих материалов и диапазона нагрузки.  
 $R_M$  – термическое сопротивление через места фактического контакта  
 $R_C$  - термическое сопротивление среды  
 $\lambda_C$  - теплопроводность среды  
 $R_k$  – контактное термическое сопротивление,  $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$   
 $d$  – диаметр образцов, м



$l$  – длина образцов, м

$P_{\text{нагр}}$  – мощность нагревательного элемента, Вт

$\alpha$  – термическая контактная проводимость, Вт/(м<sup>2</sup>·К), теплоотдача, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

### Список литературы

1. Меснянкин С.Ю., Ежов А.Д., Басов А.А. Определение контактного термического сопротивления на базе трехмерного моделирования соприкасающихся поверхностей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. N 5. С. 65-74.
2. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю., Богачев Е.А., Разина А.С.. Доработка и оптимизация элементов конструкции с учетом тепловых деформаций. // Тепловые процессы в технике. 2015. N 11. С. 510-516.
3. Ежов А.Д. Определение контактного термического сопротивления пары: композиционный материал С-SI-C и титановый сплав // Труды МАИ. 2015. N 82. URL: [http://trudymai.ru/upload/iblock/34e/ezhov\\_rus.pdf](http://trudymai.ru/upload/iblock/34e/ezhov_rus.pdf)
4. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю. Моделирование шероховатых поверхностей для контактных задач с композиционными материалами // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21. N 2. С. 272-281 .
5. Ежов А.Д. Численное решение задачи контактного взаимодействия шероховатых поверхностей энергетических установок. // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. N 1. С. 68-79.
6. Быков Л.В., Ежов А.Д., Оптимизация конструкции теплонапряжённой энергетической установки на основании теплопрочностного расчёта. // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 11. С. 483-486.
7. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В. . Численный метод определения фактической площади контакта соприкасающихся тел . // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 9. С. 92-96.
8. A.D. Ezhov, L.V. Bykov, S.Yu. Mesnyankin. Numerical Method for Determining the Real Contact Area of Contacting Bodies // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. September 2018, Volume 12, Issue 5, pp 914–917 <https://doi.org/10.1134/S1027451018050130>

9. A.D. Ezhov, L.V. Bykov, N.V. Artemchuk. Related problems of designing heat-loaded structures from ceramic matrix // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 683 (2019) 012083, conference 1, doi:10.1088/1757-899X/683/1/012083, 12 P.
10. L.V. Bykov, A.D. Ezhov. Three-dimensional of modeling microgeometry of contact pairs in technical systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 709 (2020) 022057, issue 1, doi:10.1088/1757-899X/709/2/022057, 5 P.
11. A.D. Ezhov , L.V. Bykov, S.V.Reznik. Effect of radiation on the contact thermal resistance in vacuum // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 927 (2020) 012076, IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/927/1/012076, 6 P.
12. A.D. Ezhov , L.V. Bykov, N.S. Golikov. Assessment of the influence of contact surface roughness on thermal conductivity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 971 (2020) 042047, IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/4/042047>.
13. L A Martynyuk, D V Afanasiev, L V Bykov, A D Ezhov and M A Mezintsev. The study of the applicability of polymer composite materials for the manufacture of the impeller of a centrifugal compressor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1060 (2021) 012026, doi:10.1088/1757-899X/1060/1/012026, 7 P.
14. В.П. Киселев, А.Д. Ежов, С.Д. Селиверстов, Л.В. Быков, Е.В. Сотник // Анизотропия теплопроводности аддитивных металлов, полученных методом селективного лазерного сплавления на примере нержавеющей стали CL 20ES. Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. №7. С. 329–334
15. Talalaeva, P, Bykov, L and Ezhov, A. Investigation of the thermal characteristics of a metal-anisotropic composite contact pair. Journal of Physics: Conference Series. (2021). 1990. 012010. 10.1088/1742-6596/1990/1/012010.
16. Bykov L.V., Martynyuk L.A.,Ezhov A.D., Afanas'ev, D.B.; Mezentsev, M.A. Thermal Analysis of a Composite Centrifugal Compressor Impeller. - Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2022, 95 , pp. 625–635

17. Bykov, L.V., Ezhov, A.D. Experimental Study of the Anisotropy of the Heat-Conducting Properties of SAE 316L Stainless Steel Samples Obtained by Additive Technology. AIP Conference Proceedings 2503(1):020007 DOI: 10.1063/5.0100354
18. Ezhov A.D., Bykov L.V., Krylova Yu.A. Determination of the contact area under cyclic loading of contact pairs of isotropic materials on the basis of 3d surface microrelief modelling. PNRPU Mechanics Bulletin, 2022, No. 4, PP. 163-169.
19. Ежов А.Д., Полянский А.Г. Исследование применимости охлаждающего контура реактивного двигателя в целях повышения его термодинамической эффективности. // Тепловые процессы в технике. 2023 Т. 15. № 7. С. 325-331.
20. Ezhov A.D., Kotovich I.V., Kiselev V.P. Influence of additive manufacturing technology of topologically optimized products from photopolymer resins on the anisotropy of their mechanical properties. PNRPU Mechanics Bulletin, 2024, no. 2, pp. 16-23. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.02
21. Ежов А.Д., Шилов М.С., Полетаев А.О., Сотник Е.В. Математическая модель и имитационный прибор стенда исследования массового расхода двухфазных криогенных потоков на основе эффекта Кориолиса. Автоматизация. Современные технологии, 2024. Т. 78. № 9, С. 420-426.
22. Ezhov A. D., Bykov L. V., Kiselev V. P., Talalaeva P. I., Kotovich I. V., Platonov I. M., Prediction of thermal properties of solid contact. // Russian Journal of Nonlinear Dynamics, 2024, Vol. 20, no. 4, pp. 601-617.
23. A.M. Molchanov, D.S. Yanyshchev, A.D. Ezhov, L.V. Bykov. Solution of the inverse problem of heat conduction using neural networks // Heat Transfer Research, Volume 56, Issue 7, 2025, pp. 1-12
24. Григоровский В.В., Котович И.В., Ежов А.Д., Сучкова П.И. Особенности процессов термогазодинамики и теплообмена на поверхности лопаток турбин ГТД. // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17, № 1. С. 12-18.

25. Ежов А.Д., Шилов М.С., Еремкина М.С., Светличная Е.В., Киселёв В.П. Исследование теплопроводности оксидного покрытия, сформированного на материале подложки AlSiMg. // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 7. С. 313–320

26. Ежов А.Д. Температурные поля в сложных сопряженных конструкциях композитных камер сгорания ЖРД. // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2014». Москва. МАИ. 22-24 апреля 2014. С.107-108.

27. Ежов А.Д. Моделирование процессов статики и теплопередачи в контактных узлах современных энергоустановок. // Сборник аннотаций конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Москва. МАИ. 17-21 ноября 2014. С.93-94.

28. Ежов А.Д. Моделирование процессов в контактных узлах современных энергоустановок. // Сборник тезисов докладов 13-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2014». Москва. МАИ. 17-21 ноября 2014. С.222-224.

29. Ежов А.Д., Анализ теплового состояния контактных узлов современных энергоустановок. // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2015». Москва. МАИ. 21-23 апреля 2015. С.78-79.

30. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю. Задача поиска оптимальных условий контакта деталей с различными термическими коэффициентами линейного расширения. // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении». Москва. ЦИАМ. 26-28 мая 2015. С. 219-220.

31. Ежов А.Д. Моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей энергетических установок. // Сборник аннотаций конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Москва. МАИ. 16-20 ноября 2015г. С.80-81.

32. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В. Моделирование поведения теплонапряженных конструкций в зонах контакта металлов с

композиционными материалами. // Сборник тезисов докладов 14-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015». Москва. 16-20 ноября 2015. С.56-58.

33. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю. Моделирование термомеханического поведения конструкции ЖРД малой тяги в результате нагрева // Сборник докладов 6-й научно-практической Internet-конференции «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики». Тольятти. 14-15 мая 2015. С.193-200.

34. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В., Богачев Е.А. Термомеханический анализ теплонапряженных конструкций в зонах контакта металлов с композиционными материалами. // Сборник тезисов докладов XV Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск. НАН Беларуси. 23-26 мая 2016г. Т. 2. С.349-352.

35. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В. Анализ теплонапряженного состояния металло-композиционных конструкций на примере жидкостного ракетного двигателя малой тяги. // Сборник тезисов докладов XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Алушта, Крым. МАИ. 25-31 мая 2016. С.335-337.

36. Ежов А.Д. Моделирование процессов в контактных узлах современных энергоустановок. // Сборник тезисов докладов 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2016». Москва. МАИ. 14-18 ноября 2016г. С.270-271.

37. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю. Методика определения средних температур поверхностей при контактом теплообмене. // Сборник докладов 7-й научно-практической Internet-конференции «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики». Тольятти. 30-31 марта 2016. С.256-262.

38. Ежов А.Д. Моделирование шероховатости поверхности для контактных тепло-прочностных задач. // Сборник тезисов докладов XLII международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения». Москва. МАИ. 12-15 апреля 2016. Т. 1. С.105-106.

39. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л. В. Численное моделирование микрогеометрии на основе профилограммы поверхности для контактных задач.// Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017). Алушта. МАИ. 24–31 мая 2017 г. С.236-238.

40. Ежов А.Д. Методика определения межконтактного объема и пятен фактического контакта соприкасающихся поверхностей энергоустановок. // Сборник тезисов докладов XLIII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения». Москва. МАИ. 05-19 апреля 2017. С.1008.

41. Быков Л.В., Ежов А.Д. Унификация методики расчета контактного термического сопротивления элементов конструкции ка на основе матрицы коэффициентов теплопроводности и жесткости. // Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018) 2018. С. 559-560.

42. Быков Л.В., Ежов А.Д. Исследование вариантов соединений керамоматричного композита и металла в теплонагруженной конструкции. // Труды XLII академических чтений по космонавтике. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 23 – 26 января 2018 г, С.35

43. Артемчук Н.В., Ежов А.Д., Быков Л.В. Связанные задачи проектирования теплонагруженных конструкций из керамоматричных композитов. Сборник трудов Ключевые тренды в композитах: наука и технологии. сборник материалов Международной научно-практической конференции. 2019. С. 243-250. 03-07 декабря 2018г., Москва, МГТУ им. Баумана.

44. П.И. Талалаева, А.Д. Ежов. Определение теплового и напряженно-деформированного состояния контактных узлов современных энергоустановок. Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки», Москва, ЦИАМ, 28-30 мая 2019 С.63-64.

45. Арефьев Н.О., Ежов А.Д., Талалаева П.И. Исследование контактного теплообмена в соединениях коаксиальных конструкций энергетических систем. // Сборник аннотаций конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Москва. МАИ. 18-22 ноября 2019. С.66.

46. Талалаева П.И., Ежов А.Д., Артемчук Н.В., Моделирование процессов контактного теплообмена в узлах современных энергоустановок. // Сборник аннотаций конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Москва. МАИ. 18-22 ноября 2019. С.94.

47. Быков Л.В., Ежов А.Д., Артемчук Н.В., Арефьев Н.О. Исследование теплового и механического взаимодействия коаксиальных пар энергетических установок. // Сборник тезисов докладов 18-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019». Москва. 18-22 ноября 2019. С.45.

48. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Талалаева П.И., Артемчук Н.В.. Моделирование контактного взаимодействия пар керамика-металл в узлах современных энергоустановок. // Сборник тезисов докладов 18-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019». Москва. 18-22 ноября 2019. С.51.

49. Арефьев Н.О., Быков Л.В., Ежов А.Д., Оценка параметров контактного теплообмена в узлах космических аппаратов. // Сборник тезисов докладов XLIV Королевских академических чтений по космонавтике. Москва. 28-31 января 2020. С.105-106.

50. Н.О. Арефьев, Л.В. Быков, А.Д. Ежов, П.И. Талалаева. Оценка влияния переизлучения на величину контактного термического сопротивления при изменении сжимающих нагрузок в условиях вакуума. // Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ2020), Алушта, Крым, МАИ. 6-13 сентября 2020 г.

51. A.D. Ezhov, L.V. Bykov, N.S. Golikov. Assessment Of The Influence Of Contact Surface Roughness On Thermal Conductivity. // Международная



научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2020» (ICMTMTE 2020), Севастополь, СевГУ, 7-11 сентября 2020 г.

52. Мартынюк Л.А., Талалаева П.И., Ежов А.Д., Сладков И.С., Голиков Н.С. Оценка влияния ориентации укладки слоёв композитного материала на свойства теплового контакта // Сборник тезисов докладов 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2020». Москва. 23-27 ноября 2020. С.170-171.

53. Ежов А.Д., Сладков И.С., Быков Л.В., Талалаева П.И., Голиков Н.С. Методика оценки эффективности использования покрытий для снижения термического сопротивления контакта. // Сборник тезисов докладов 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2020». Москва. 23-27 ноября 2020. С.231-232.

54. Быков Л.В., Голиков Н.С., Ежов А.Д., Талалаева П.И., Сладков И.С. Модернизация алгоритма численного моделирования характеристик поверхности. // Сборник тезисов докладов 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2020». Москва. 23-27 ноября 2020. С.537-538.

55. Быков Л.В., Голиков Н.С., Ежов А.Д., Сладков И.С., Талалаева П.И. Методика построения цифрового двойника поверхности для контактных тепловых и прочностных задач. // Сборник тезисов докладов 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2020». Москва. 23-27 ноября 2020. С.222-223.

56. Л. В. Быков, А. Д. Ежов, Ю. А. Крылова // Цифровой двойник поверхности в задачах контактного взаимодействия. Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., Алушта, Крым.

57. Быков Л.В., Ежов А.Д. Экспериментальное исследование анизотропии теплопроводящих свойств образцов из нержавеющей стали марки SAE 316L, полученных по аддитивной технологии // Международная научно-техническая конференция «Современные направления и

перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (ICMTMTE 2021). 6-10 сентября 2021 г., Севастополь, Россия.

58. Крылова Ю.А., Ежов А.Д., Киселёв В.П. Моделирование термомеханического взаимодействия поверхности тепловой трубы и изоляционного материала спускаемого аппарата. // Сборник тезисов докладов 20-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2021». 22-26 ноября 2021 г., г. Москва, М.: Издательство "Перо", 2021 г., С.118-120.

59. Киселёв В.П., Ежов А.Д., Быков Л.В. Исследование влияния ориентации слоев аддитивных металлов, полученных методом селективного лазерного сплавления на величину коэффициента теплопроводности. // Сборник тезисов докладов 20-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2021». 22-26 ноября 2021 г., г. Москва, М.: Издательство "Перо", 2021 г., С.110-112.

60. Крылова Ю.А., Ежов А.Д., Платонов И.М. Исследование влияния теплового расширения материалов на величину контактного термического сопротивления. // Сборник тезисов докладов 21-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2022». г. Москва, С.136-137.

61. Ежов А.Д., Киселёв В.П., Быков Л.В., Котович И.В. Оценка влияния технологии аддитивного производства на теплофизические свойства изделия. // Сборник тезисов докладов международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии» 21-25 августа 2023, г. Минск, Беларусь, С.156-157.

62. Киселев В.П., Ежов А.Д., Быков Л.В., Котович И.В., Талалаева П.И., Теоретическое и экспериментальное обоснование влияния технологии аддитивного производства на теплофизические свойства деталей из алюминиевого сплава AlSi10Mg, 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», 20-24 ноября 2023г., Москва. Сборник тезисов докладов, С. 292-293;

63. Талалаева П.И., Ежов А.Д., Платонов И.М., Зубко А.А., Киселев В.П., Метало-композитный переход в замковых соединениях высоконагруженных энергоустановок, формируемый с использованием низкотемпературного послойного выращивания гетерогенным потоком, 22-я

Международная конференция «Авиация и космонавтика», 20-24 ноября 2023г., Москва. Сборник тезисов докладов, С. 106-107;

64. Талалаева П.И., Ежов А.Д., Киселев В.П., Концепция металло-композитного перехода для замковых соединений высконагруженных энергоустановок сформированным на базе низкотемпературного послойного выращивания гетерогенным потоком, XV Всероссийский межотраслевого молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», 20–24 ноября 2023, Москва. Сборник аннотаций конкурсных работ, С.62.

65. Ежов А.Д., Быков Л.В., Киселёв В.П., Талалаева П.И. Решение задачи контактного теплообмена в сборных узлах энергетических установок на основе цифрового двойника поверхностей. // Сборник материалов Minsk International Heat and Mass Transfer Forum MIF–XVII, г. Минск, 2024 г., С. 929-932

66. Киселёв В.П., Ежов А.Д., Быков Л.В., Талалаева П.И., Котович И.В. Управление направлением теплового потока в изделиях, изготовленных по аддитивным технологиям, за счет использования анизотропии теплофизических свойств материала. // Сборник материалов Minsk International Heat and Mass Transfer Forum MIF–XVII, г. Минск, 2024 г., С. 626-628.

67. Талалаева П.И., Ежов А.Д., Быков Л.В., Зубко А.А., Киселёв В.П. Контактный теплообмен в соединении металла со сформированным газодинамическим низкотемпературным методом барьерным покрытием композитного материала. // Сборник материалов Minsk International Heat and Mass Transfer Forum MIF–XVII, г. Минск, 2024 г., С. 532-534.

68. Хуршудов А.Г., Ежов А.Д. Учебно-исследовательская установка измерения теплопроводности образцов материала методом лазерной вспышки. В сборнике: Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции памяти профессора А. В. Алиева. Ижевск, 2024. С. 83.

69. Ежов А.Д., Шилов М.С., Полетаев А.О. Тепловой и прочностной расчет контактной пары термобарьерного покрытия и стенки цилиндра поршневого двигателя, изготовленного по аддитивной технологии. В сборнике: Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции памяти профессора А. В. Алиева. Ижевск, 2024. С. 24-25.

70. Ежов А.Д., Полетаев А.О., Шилов М.С., Родин В.Д. Экспериментальный стенд для измерения параметров и оценки эффективности малоразмерных ДВС. В сборнике: Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции памяти профессора А. В. Алиева. Ижевск, 2024. С. 22-23.

71. Ежов А.Д., Быков Л.В., Сучкова П.И., Светличная Е.В. Решение задачи контактного теплообмена нейросетевым моделированием на основе макета цифрового двойника поверхностей. // 23-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 18-22 ноября 2024 года. Москва. Тезисы. М.: Издательство «Перо», 2024— 3,2 Мб [Электронное издание]. стр.191-192

72. Киселев В.П., Ежов А.Д., Быков Л.В. Управление температурным режимом конструкции на основе проектирования анизотропии тепловых свойств изделий изготовленных с применением аддитивных технологий. //Сборник тезисов «XIII научно-техническая конференция молодых инженеров «Энергия молодости» г.Санкт-Петербург, 2025

73. Ежов А.Д., Быков Л.В., Киселев В.П. Нейросетевая модель контактного теплообмена для решения задач обеспечения теплового состояния сборных узлов энергетических установок. //Сборник тезисов «XIII научно-техническая конференция молодых инженеров «Энергия молодости», г.Санкт-Петербург, 2025

74. Ежов А.Д., Быков Л.В., Ежов Д.В. Современный подход к определению контактного термического сопротивления // Математические методы в технологиях и технике. 2025, № 9, с.60-64

75. Ежов А.Д., Быков Л.В., Ежов Д.В. Снижение неопределенности в расчетах термической проводимости контакта: комплексные методы для энергоэффективного управления тепловыми режимами.// Сборник доклада Всероссийской конференции с международным участием «XLI Сибирский теплофизический семинар», посвященной 75-летию академика РАН Алексеенко Сергея Владимировича, 7 – 10 октября 2025 года, г. Новосибирск, С. 11

76. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В., Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015618021 «Определение координат точек шероховатой плоской поверхности» от 28.06.2015 г.

77. Ежов А.Д., Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2025687938 «Расчет контактной термической проводимости на базе нейросетевого моделирования» от 07.10.2025 г.

78. Fumiaki W., Takeshi N. The Application of Ceramic Matrix Composite to Low Pressure Turbine Blade // Proceedings of GT2016 ASME Turbo Expo. 2016. GT2016-56614

79. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. 1202 с.

80. Facchini B, Simonetti F, Tarchi L, et al. Measurement of thermal contact conductance of a heat shield for gas turbine combustors in a realistic test rig set-up. Heat Transf Parts A B 2012; 4: 945.

81. Pusch D, Voigt M, Vogeler K, et al. Setup, validation and probabilistic robustness estimation of a model for prediction of LCF in steam turbine rotors. Proc ASME Turbo Expo. Epub ahead of print 20 September 2016.

82. Wirsum M, Łuczyński P, Helbig K, et al. Modeling of ?warm-keeping? process with hot air in steam turbines. J Power Technol 2017; 97: 416–428.

83. Feuerstein A, Knapp J, Taylor T, et al. Technical and economical aspects of current thermal barrier coating systems for gas turbine engines by thermal spray and EBPVD: a review. J Therm Spray Technol 2008; 17: 199–213.

84. Miller RA. Current status of thermal barrier coatings – an overview. *Surf Coat Technol* 1987; 30(1): 1–11.
85. Madhusudana CV, Fletcher LS. Contact heat transfer – the last decade. *AIAA J* 1986; 24: 510–523.
86. Lambert MA, Fletcher LS. Review of the thermal contact conductance of junctions with metallic coatings and films. *J Thermophys Heat Transf* 1993; 7: 547–554.
87. Hao G, Liu Z. Thermal contact resistance enhancement with aluminum oxide layer generated on TiAlN-coated tool and its effect on cutting performance for H13 hardened steel. *Surf Coat Technol* 2020; 385: 125436.
88. Мальков В.А., Фаворский О.Н., Леонтьев В.Н. Контактный теплообмен в газотурбинных двигателях и энергоустановках. М: Машиностроение, 1978. 144 с.
89. Резник С.В., Просунцов П.В., Сапронов Д.В. Исследование теплового и механического контакта керамической лопатки и металлического диска в рабочем колесе газовой турбины // Теплофизические основы энергетических технологий: Сб. статей V Всеросс. научн. конф. с междунар. участием. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. С. 325–336.
90. Сапронов Д.В. Разработка методики проектирования замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском в перспективных аэрокосмических двигательных установках: дис. канд. техн. наук: 05.07.03 – МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2017. 153 с.
91. J. Jeong, et al., A study on the correlation between the thermal contact conductance and effective factors in fin–tube heat exchangers with 9.52 mm tube, *Int. J. Heat Fluid Flow* 25 (6) (2004) 1006–1014.
92. J. Jeong, C.N. Kim, B. Youn, A study on the thermal contact conductance in fin–tube heat exchangers with 7 mm tube, *Int. J. Heat Mass Transf.* 49 (7–8) (2006) 1547–1555.
93. D. Tang, et al., A new approach in evaluation of thermal contact conductance of tube–fin heat exchanger, *Appl. Therm. Eng.* 30 (14–15) (2010) 1991–1996.

94. C. Madhusudana, W.W. Cheng, Decrease in thermal contact conductance and the contact pressure of finned-tube heat exchangers assembled with different size bullets, *ASME J. Heat Transf.* 129 (7) (2007) 907–911.
95. J.W. Sheffield, H.J. Sauer, R.A. Wood, An experimental method for measuring the thermal contact resistance of plate finned tube heat exchangers, *ASHRAE Trans.* 93 (1987) 776–785.
96. K. Nho, M.M. Yovanovich, Measurement of contact resistance in finned tube heat exchangers, *ASHRAE Trans.* 95 (1989) 370–378.
97. Marchal N, Campos C and Garnier C. Finite element simulation of ?pellet-cladding? interaction (PCI) in nuclear fuel rods. *Comput Mater Sci* 2009; 45: 821–826.
98. Todreas NE and Kazimi MS. Nuclear systems thermal hydraulic fundamentals, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2021.
99. Jacobs G and Todreas N. Thermal contact conductance in reactor fuel elements. *Nucl Sci Eng* 1973; 50: 283–290.
100. Ajay K, Kumar R, Gupta A, et al. Experimental simulation of channel ?heat-up? behaviour under slumped fuel pin condition for Indian PHWR. *Ann Nucl Energy* 2020; 146: 107615.
101. Ajay K, Kumar R, Mukhopadhyay D, et al. Influence of PT-CT contact on PHWR fuel channel thermal behaviour under accident condition – an experimental study. *Nucl Eng Des* 2020; 361: 110543.
102. Sharaf OZ and Orhan MF. An overview of fuel cell technology: fundamentals and applications. *Renew Sustain Energ Rev* 2014; 32: 810–853.
103. EG&G Technical Services. I. fuel cell handbook. Boca Raton: CRC press, 2002.
104. von Spakovsky MR and Olsommer B. Fuel cell systems and system modeling and analysis perspectives for fuel cell development. *Energy Convers Manag* 2002; 43: 1249–1257.
105. Behling NH. Fuel cells-current technology challenges and future research needs. In: *Fuel cells and the challenges ahead*. Newnes: Elsevier, 2012, pp. 7–36.

106. Gasik M. Materials for fuel cells. Mater Fuel Cells (vol. 1). Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2008; 1–498.
107. Dillig M, Biedermann T and Karl J. Thermal contact resistance in solid oxide fuel cell stacks. J Power Sources 2015; 300: 69–76.
108. Kandlikar SG and Lu Z. Thermal management issues in a PEMFC stack – a brief review of current status. Appl Therm Eng 2009; 29: 1276–1280.
109. Valentino Paolo Berardi, Nicola Meola, Michele Ferraiuolo. Mass minimization approach for the optimal preliminary design of CMC inner liners in rocket thrust chambers // Forces in Mechanics 16 (2024) 100281
110. Savino, Raffaele & Mungiguerra, Stefano & Di Martino, Giuseppe. (2018). Testing ultra-high-temperature ceramics for thermal protection and rocket applications // Advances in Applied Ceramics. 117. s9–s18. 10.1080/17436753.2018.1509175.
111. Воробьев А.Г., Боровик И.Н., Казеннов И.С., Лахин А.В., Богачев Е.А., Тимофеев А.Н. Разработка ЖРД малой тяги с камерой сгорания из углерод-керамического композиционного материала. // Вестник МАИ, т. 17, № 3, 2010, Москва, МАИ, с. 135–143.
112. Кошлаков В.В. Перспективы применения композиционных материалов в ракетных двигателях // Ракетно-космические двигательные установки: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. С. 10–11.
113. M. Ortelt, F. Breede, A. Herbertz, D. Koch, H. Hald. Current activities in the field of ceramic based rocket engines. ONERA-DLR Aerospace Symposium 2013, 27–29 May 2013, Palaiseau (Paris), France.
114. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 327 с.
115. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 216 с.
116. Меснянкин С.Ю. Методы расчёта и регулирования контактных термических сопротивлений // Сборник научных трудов «Тепловое проектирование систем». М.: Изд-во МАИ, 1990. С. 78–86.



117. Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин и др. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей. Учебное издание. М.: Машиностроение, 1989. 424 с.
118. Ramamurthi K, Kumar S S, Abilash P M. Thermal contact of molybdenum-sulphide-coated joints at low temperature. *J. Thermophys. Heat Transf.* 2007; 21(4): 811–813.
119. Culham J R, Khan W A, Yovanovich M M, et al. The influence of material properties and spreading resistance in the thermal design of plate fin heat sinks. *Trans. ASME J. Electron. Packag.* 2007; 129: 76–81.
120. M. Rosochowska, R. Balendra, K. Chodnikiewicz. Measurements of Thermal Contact Conductance. *Journal of Materials Processing Technology* 135 (2003): 204–210.
121. R. Tandon, et al. Ultra High Temperature Ceramics for Hypersonic Vehicle Applications. Albuquerque, Sandia National Laboratories, 2006.
122. Y.J. Xu, et al. A multi-layer integrated thermal protection system with C/SiC composite and Ti alloy lattice sandwich. *Compos. Struct.* 230 (2019) 111507.
123. D.H. Liu, Y. Luo, X.C. Shang. Experimental investigation of high temperature thermal contact resistance between high thermal conductivity C/C material and Inconel 600. *Int. J. Heat Mass Transf.* 80 (2015) 407–410.
124. R.R. Kumar, et al. Role of thermal contact conductance on sandwich-type metallic thermal protection system profile. *AIAA J.* 50(10) (2012) 2194–2201.
125. X.J. Ren, et al. Numerical prediction of thermal contact resistance of 3D C/C-SiC needled composites based on measured practical topography. *Int. J. Heat Mass Transf.* 131 (2019) 176–188.
126. C. Zhang, et al. Prediction of thermal contact resistance for reusable heat-pipe cooled thermal protection system based on an inverse thermo-mechanical coupling method. *Renew. Energy* 227 (2024) 120541.
127. Viswanath R, Wakharkar V, Watwe A, et al. Thermal performance challenges from silicon to systems. *Int. Technol. J.* 2000; 4(3): 1–16.

128. WANG Chang-hong; ZHU Dong-sheng. Research progress on thermoelectric cooling technology applied in electronic packaging thermal management. *Electronic Components and Materials*, 2008, 27(11): 4–7.
129. Lu Xiang-you, Hua Tse-Chao, Wang Yan-Ping. Thermal analysis of high power LED package with heat pipe heat sink. *Microelectronics Journal*. 2011; 42: 1257–1262. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2011.08.009>
130. Arik M, Petroski J, Weaver S. Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: light emitting diodes. *ASME/IEEE International Packaging Technical Conference*, 2001: 113–120.
131. Grzes P, Oliferuk W, Adamowicz A, et al. The ?numerical–experimental? scheme for the analysis of temperature field in a pad-disc braking system of a railway vehicle at single braking. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2016; 75: 1–6.
132. Talati F, Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system. *Heat Mass Transf.* 2009; 45: 1047–1059.
133. Razavi M, Muzychka YS, Kocabiyik S. Review of advances in thermal spreading resistance problems. *J. Thermophys. Heat Transf.* 2016; 30: 863–879.
134. Cho MH, Kim SJ, Basch RH, et al. Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: the effect of rotor microstructure. *Tribol. Int.* 2003; 36: 537–545.
135. Blau PJ, Meyer HM. Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials. *Wear* 2003; 255: 1261–1269.
136. Maleque MA, Dyuti S, Rahman MM. Material selection method in design of automotive brake disc. *Proc. World Congr. Eng.* 2010; III: 5.
137. EG&G Technical Services. *I. fuel cell handbook*. Boca Raton: CRC press, 2002.
138. von Spakovsky MR, Olsommer B. Fuel cell systems and system modeling and analysis perspectives for fuel cell development. *Energy Convers. Manag.* 2002; 43: 1249–1257.

139. Hunter JE, Cartier SS, Temple DJ, et al. Brake fluid vaporization as a contributing factor in motor vehicle collisions. SAE Trans. 1998. DOI: 10.4271/980371
140. Singhal V, Litke PJ, Black AF, et al. An experimentally validated thermo-mechanical model for the prediction of thermal contact conductance. Int. J. Heat Mass Transf. 2005; 48: 5446–5459.
141. Bahrami M, Culham JR, Yovanovich MM, et al. Review of thermal joint resistance models for nonconforming rough surfaces. Appl. Mech. Rev. 2006; 59(1): 1–12.
142. McWaid TH, Marschall E. Application of the modified Greenwood and Williamson contact model for the prediction of thermal contact resistance. Wear 1992; 152: 263–277.
143. Jackson RL, Streater JL. A "multi-scale" model for contact between rough surfaces. Wear 2006; 261: 1337–1347.
144. Fletcher LS. Recent developments in contact conductance heat transfer. ASME Trans. J. Heat Transf. 1988; 110: 1059–1070.
145. Sadowski P, Stupkiewicz S. A model of thermal contact conductance at high real contact area fractions. Wear 2010; 268: 77–85.
146. T.D. Jacobs, et al., The surface-topography challenge: Problem definition. arXiv preprint. arXiv:2206.13384, 2022.
147. M.H. Muser, et al., Meeting the contact-mechanics challenge, Tribol. Lett. 65 (2017) 4.
148. Holm R. Electric Contacts: Theory and Applications. New York: Springer-Verlag. 1967. 486 p.
149. Holm R. Contact resistance especially at carbon contact // Zeitschrift fur Technische Physik. 1922. Vol. 3. no. 9. P. 290-294/.
150. Мурашов М.В., Панин С.Д., Климов С.М. Численное моделирование электрической проводимости контактов шероховатых тел // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 1. С.189-200

151. Carrete J., Gallego L.J., Varela L.M. Surface roughness and thermal conductivity of semiconductor nanowires: Going below the Casimir limit // *Physical Review B*. 2011. Vol. 84. no. 24.
152. Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism. Vol. 1. Oxford: Clarendon press. 1873. 453 p.
153. Pennec F. Modelisation du contact metal-metal: Application aux microconmutateurs MEMS RF. PhD These. Universite de Toulouse. 2009. 190 p.
154. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия. 1978. 392 с.
155. Yovanovich M.M. Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics. *IEEE Trans Compon Packaging Technol* 2005; 28: 182–206.
156. Ганин Е.А. Физическая модель контактного теплообмена // *Теплотехнические проблемы энергосберегающих технологий в технике и легкой промышленности*. 1989. С.6-22.
157. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П., Кузнецов Ю.В. Анализ тепловой модели контактного теплообмена шероховатых поверхностей // *ИФЖ*. 1980. Т.38. № 3. С.441-449.
158. Banzami M., Culham J.R., Yovanovich M.M., Schneider G.E. Thermal contact resistance of non-conforming rough surfaces. Part 2. Thermal model // In proceedings of the 36th AIAA, Thermophysics Conference, AIAA Pap № 2003-4198, June 23-26, Orlando, FL, 2003.
159. Barry G.W., Goodling J.S. A Stefan problem with contact resistance // *ASME J. Heat. Transfer*. 1987. vol.109. P.820-826.
160. Razavi M, Muzychka YS, Kocabiyik S. Review of advances in thermal spreading resistance problems. *J Thermophys Heat Transf* 2016; 30: 863–879.
161. Mikic B. Thermal contact resistance.
162. Cooper MG, Mikic BB, Yovanovich M.M. Thermal contact conductance. *Int J Heat Mass Transf* 1969; 12: 279–300.

163. Gibson RD. The contact resistance for a semi-infinite cylinder in a vacuum. Appl Energy 1976; 2: 57–65. Gibson RD. The contact resistance for a semi-infinite cylinder in a vacuum. Appl Energy 1976; 2: 57–65.
164. Yovanovich MM. General expressions for constriction resistances due to arbitrary flux distributions at non-symmetric, coaxial contacts. In: 13th aerospace sciences meeting, 1975, pp.20–22.
165. Negus KJ, Yovanovich MM. Application of the method of optimized images to steady three-dimensional conduction problems. ASME Annu Meet 1984; 84: 9–13.
166. Кошкин В.К., Данилов Ю.И., Меснянкин С.Ю., Михайлова Т.В. Анализ расчетных моделей теплового контактирования. Тепло- и массообмен при взаимодействии потока с поверхностью // Научные труды МАИ. 1981. С.68-75.
167. Banzami M., Culham J.R., Yovanovich M.M., Schneider G.E. Thermal contact resistance of non-conforming rough surfaces. Part 2. Thermal model // In proceedings of the 36th AIAA, Thermophysics Conference, AIAA Pap № 2003-4198, June 23-26, Orlando, FL, 2003.
168. Muzichka Y.S., Sridhar M.R., Yovanovich M.M., Antonetti V.W. Thermal spreading resistance in multilayered contacts: Applications in thermal contact resistance // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 1999. vol. 13. no. 4. P. 489-494.
169. Prasher R. Acoustic mismatch model for thermal contact resistance of van der Waals contacts. Appl Phys Lett 2009; 94: 041905.
170. Pratap D, Islam R, Al-Alam P, et al. Effect of air confinement on thermal contact resistance in nanoscale heat transfer. J Phys D Appl Phys 2018; 51: 125301.
171. Zhu X, Gao R, Gong H, et al. UO<sub>2</sub>/BeO interfacial thermal resistance and its effect on fuel thermal conductivity. Ann Nucl Energy 2021; 154: 108102.
172. Dai YJ, Gou JJ, Ren XJ, et al. A test-validated prediction model of thermal contact resistance for Ti-6Al-4V alloy. Appl Energy 2018; 228: 1601–1617.

173. Frekers Y, Helmig T, Burghold EM, et al. A numerical approach for investigating thermal contact conductance. *Int J Therm Sci* 2017; 121: 45–54.
174. Kumar SS, Ramamurthi K. Prediction of thermal contact conductance in vacuum using Monte Carlo simulation. *J Thermophys Heat Transf* 2001; 15: 27–33.
175. Zahouani H, Vargiolu R, Loubet JL. Fractal models of surface topography and contact mechanics. *Math Comput Model* 1998; 28: 517–534.
176. Murashov MV, Panin SD. Numerical modelling of contact heat transfer problem with work hardened rough surfaces. *Int J Heat Mass Transf* 2015; 90: 72–80.
177. Xu R, Feng H, Zhao L, et al. Experimental investigation of thermal contact conductance at low temperature based on fractal description. *Int Commun Heat Mass Transf* 2006; 33: 811–818.
178. Мадхусудана К.В., Флетчер Л.С. Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия // *Аэрокосмическая техника*. 1987. №3. С.103-121.
179. Харитонов В.В., Якутии Н.В. Контактный теплообмен разнородных материалов // *Журнал технической физики*. 1997. Т. 67. № 2. С.1-6.
180. Мишуренко А.Б., Смолякова Л.А., Потопаева О.П., Козловский С. Модель контактирования двух шероховатых поверхностей для определения контактного сопротивления // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2012. Т. 1. № 8. С.97-98.
181. Киселёв И.Г., Крылов Д.В.. Математическое моделирование контактного теплообмена при упругой деформации микровыступов шероховатых поверхностей. // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. 2012. Т. 2. С. 92-96.
182. Contact of nominally flat surfaces. *Proc R Soc London Ser A Math Phys Sci* 1966; 295: 300–319.
183. Ma C, Zhao L, Shi H, et al. A geometrical–mechanical–thermal predictive model for thermal contact conductance in vacuum environment. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2016; 230: 1451–1464.

184. Sridhar MR, Yovanovich MM. Review of elastic and plastic contact conductance models – comparison with experiment. *J Thermophys Heat Transf* 1994; 8: 633–640.
185. Mikić BB. Thermal contact conductance; theoretical considerations. *Int J Heat Mass Transf* 1974; 17: 205–214.
186. Hegazy AA-H. Thermal joint conductance of conforming rough surfaces: effect of surface micro-hardness variation. Waterloo: University of Waterloo, <http://hdl.handle.net/10012/10844> (1985, accessed February 2021).
187. Sridhar MR, Yovanovich MM. Elastoplastic contact conductance model for isotropic conforming rough surfaces and comparison with experiments. *J Heat Transf* 1996; 118: 3–9.
188. Fang WZ, Gou JJ, Chen L, et al. A multi-block lattice Boltzmann method for the thermal contact resistance at the interface of two solids. *Appl Therm Eng* 2018; 138: 122–132.
189. Jackson RL, Bhavnani SH, Ferguson TP. A multiscale model of thermal contact resistance between rough surfaces. *J Heat Transf* 2008; 130: 081301.
190. Zhang J, Liu Y, Yan K, et al. A fractal model for predicting thermal contact conductance considering elasto-plastic deformation and base thermal resistances. *J Mech Sci Technol* 2019; 33: 475–484.
191. Dai YJ, Ren XJ, Wang YG, et al. Effect of thermal expansion on thermal contact resistance prediction based on the dual-iterative thermal–mechanical? coupling method. *Int J Heat Mass Transf* 2021; 173: 121243.
192. Харитонов В.В., Якутии Н.В. Контактный теплообмен разнородных материалов // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. № 2. С.1-6.
193. Барановский Э.Ф., Севастьянов П.В. Исследование контактного теплообмена при намораживании на движущихся кристаллических заторах // Вестник АН БССР. Серия физ.-техн. Наук. 1983. № 1. С.59-62.
194. Пономарев Б.П. Влияние качества контактных соединений на локализацию температурного поля // Полупроводниковые приборы и

преобразовательные устройства. Проектирование, расчет, моделирование, контроль. 1986. С. 4-12.

195. Попов В.М. Термическое сопротивление контакта волнистых поверхностей в вакууме. ИФЖ. 1974. Т. 27. № 5. С. 811-817.

196. Martin K.A., Yovanovich M.M. Method of moments formulation of thermal constriction resistance of arbitrary contacts // AIAA Pap..1984. No 1745. p. 7.

197. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988, 286 с.

198. Мешков В.В., Зоренко Д.А.. САЕ-моделирование температурных полей поверхности трения с учетом экспериментально определенной субмикроемметрии. // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2014. № 7. С. 25-29

199. Меснянкин С.Ю., Диков А.В.. Численный расчет теплового контактирования твердых тел. От моделей до реальных поверхностей // Тепловые процессы в технике. 2014. № 5. С. 230-235.

200. Thompson, M. K. "Finite Element Modeling of Multi-Scale Thermal Contact Resistance." Proceedings of the 1st ASME Micro/Nanoscale Heat Transfer International Conference (MNHT2008-52385), January 6-9, 2008, Tainan, Taiwan. 9 pages.

201. Thompson, M. K., Thompson, J.M., "Considerations for Predicting Thermal Contact Resistance in ANSYS." Proceedings of the 17th KOREA ANSYS User's Conference, November 8-9, 2007, Cheongju, South Korea. 5 pages

202. Zhang, X., Chong, P., Fujiwara, S., Fujii, M.: A new method for numerical simulation of thermal contact resistance in cylindrical coordinates // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. № 47, P.1091-1098

203. Ayers, G.H.: Cylindrical thermal contact conductance. Master's Thesis, Texas A&M University, College Station, Texas, USA (2003)



204. Jackson, R.L., Bhavnani, S.H., Ferguson, T.P: A multiscale model of thermal contact resistance between rough surfaces. // Journal of Heat Transfer. 2008. № 130. 81301
205. Salti, B., Laraqi, N.: 3-D numerical modeling of heat transfer between two sliding bodies: temperature and thermal contact resistance. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999. № 42. P. 2363-2374
206. Thompson, M.K.: A multi-scale iterative approach for finite element modeling of thermal contact resistance. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, USA (2007)
207. Zavarise, G., Wriggers, P., Stein, E., Schrefler, B.A.: Real contact mechanisms and finite element formulation - A coupled thermomechanical approach. // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1992. № 35. P. 767-785
208. Temizer, i., Wriggers, P.: Thermal contact conductance characterization via computational contact homogenization: A finite deformation theory framework. // International Journal for Numerical Methods in Engineering. (1), 24-58,
209. Тарасов В.В., Сивцев Н.С.. Численное моделирование контакта шероховатых поверхностей. // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. 2007. № 1. С. 160-165.
210. Bhushan B. Principles and applications of tribology. ~ A Wiley-Interscience Publication, 1999. 1020p.
211. Peng, W. and Bhushan, B. A numerical three-dimensional model for the contact of layered elastic/plastic solids with rough surfaces by variational principle. // Translate ASME Journal Tribology. 2001. № 123. P. 330-342
212. Лазарев В.Е., Грамм М.И., Лазарев Е.А., Лаврик А.Н., Франек Ф., Паушитц А., Форлауфер Г., Джейза Р.. Математическая модель шероховатой поверхности контактного трибосопряжения. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2006. № 11 (66). С. 54-58.

213. Popov Valentin L. Kontaktmechanik und Reibung. Em Lehrimnd Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation. // Springer-Verlag. 2009, P. 328
214. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage, 2001.
215. Popov Valentin L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications Springer-Verlag, 2010, 362 p.
216. S. Hyun, M. O. Robbins. Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small wavelengths. // Tribology International. 2007. v.40, pp. 1413-1422.
217. I.N. Sneddon. The Relation between Load and Penetration in the Axisym-metric Bossiness Problem for a Punch of Arbitrary Profile.// International Journal Engineering Science. 1965. Vol. 3, pp. 47-57.
218. Чернов Д.О., Сергеев Д.А., Мешков В.В.. О моделировании кинетики образования площади контакта шероховатых поверхностей. // Вестник Тверского государственного технического университета. 2012. № 20. С. 42-46.
219. Majumdar A., Bhushan B. Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces // ASME J. of Tribology, 1990.Vol. 112. P. 205-216.
220. Yan W., Komvopoulos K. Contact analysis of elastic-plastic surfaces // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. №. 7. P. 3617- 3624.
221. Hyun, et al. "Finite element analysis of contact between elastic self-affine surfaces." Phys. Rev. E 70, 026117 (2004)
222. Thompson, M.K.. A Comparison of Methods to Evaluate the Behavior of Finite Element Models with Rough Surfaces. // Scanning. 2011. Vol. 33. Issue 5. P. 353-369.
223. Thompson, M.K., Thompson, J. M.. Considerations for the Incorporation of Measured Surfaces in Finite Element Models. // Scanning. 2010. Vol. 32, Issue 4. P.183-198.
224. Kwon, O. H., Thompson, J. M., Thompson, M. K.. The Effect of Surface Smoothing and Mesh Density of Real Surfaces in Contact.// Proceedings

of the International Conference on Surface Metrology, Oct. 26-28, 2009, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA

225. Wriggers, P.: Computational Contact Mechanics, 2nd edn. Springer, Berlin (2006)

226. Komvopoulos. K. Elastic finite element analysis of multi-asperity contact / K. Komvopoulos. D.H. Choi // ASME Journal of Tribology. 1992. № 114. P. 823-831.

227. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1982. 20 с.

228. Демкин, Н.Б. Топографические характеристики поверхности и точность их определения. // Механика и физика контактного взаимодействия. 1978. С. 16-29.

229. Zavarise, G., Borri-Brunetto, M., Paggi, M.: On the reliability of microscopical contact models. Wear 257, 229-245 (2004)

230. Izmailov, V.V. Correlation between surface topography and profile statistical parameters. // Wear. 1980. V. 59. P. 409-420.

231. Беркович, И.И. Расчет статистических характеристик шероховатой поверхности // Механика и физика контактного взаимодействия. 1977. С. 3-16.

232. Бенгтссон, А. Получение топографического изображения поверхности с помощью профилографа. // Трение и износ. 1986. Т. 7. № 1. С. 27-35.

233. Демкин, Н.Б. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей. // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 1. С. 7-15.

234. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 478 с.

235. Bhushan, B. Contact mechanics of rough surfaces intribology: multiple asperity contact / B. Bhushan // Tribology

236. Болотов А.Н., Сутягин О.В., Рачишкин А.А. Компьютерное моделирование топографии шероховатых поверхностей. // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей

технологического и энергетического оборудования. 2014. № 7. С. 29-41.

237. Грязев В.М. Моделирование реальной поверхности детали. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып.1. С.192-200

238. Войнов К.Н., Ходаковский В.А., Шварц М.А. Математическое моделирование шероховатых поверхностей. // Трение, износ, смазка. 2009. №41. С.1-9

239. Попов В.М., Краснобородько А.И.. К определению термического контактного сопротивления в газовой среде. ИФЖ. 1975. Т. 28. № 5. С. 875-883.

240. Попов В.М., Лушникова Е.Н., Черноухов П.А.. Тепловое контактирование металлических поверхностей с оксидными пленками. // Лесотехнический журнал. 2012. № 1. С. 7-12.

241. Bahrami, M., Yovanovich, M.M., Marotta, E.E.: Thermal joint resistance of polymer-metal rough interfaces. // Journal of Electronic Packaging. 2006. № 128, P. 23-29.

242. Gibbins, J.: Thermal contact resistance of polymer interfaces. PhD thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada (2006)

243. Prasher, R.: Thermal interface materials: Historical perspective, status and future directions. // Proceedings of the IEEE. 2006. № 94(8). P. 1571-1586

244. Prasher, R.S., Matayabas, J.C.: Thermal contact resistance of cured gel polymeric thermal interface material. // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2004. № 27(4). P. 702-709

245. Temizer, I., Wriggers, P.: A multiscale contact homogenization technique for the modeling of third bodies in the contact interface. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2008. № 198. P. 377-396

246. Wriggers, P., Reinelt, J.: Multi-scale approach for frictional contact of elastomers on rough rigid surfaces. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2009. № 198. P.1996-2008

247. Greenwood J.A. Constriction resistance and the real area of contact. // British Journal of Applied Physics. 1966. Vol. 17. no.12. P.1621-1632.

248. Cetinkale, T. N., and Fishenden, M., Thermal Conductance of Metal Surfaces in Contact // General Discussion on Heat Transfer: Conf. of the Inst. of Mechanical Engineers and the American Society of Mechanical Engineers, Inst. of Mechanical Engineers, London, 1951.

249. Fenech, H., and Rohsenow, W. M. Thermal Conductance of Metallic Surfaces in Contact // U.S. Atomic Energy Commission Rept., NYO-2136, May 1959.

250. Fenech, H., and Rohsenow, W. M. Prediction of Thermal Conductance of Metallic Surfaces in Contact // Journal of Heat Transfer, Vol. 85, Feb. 1963, pp. 15– 24.

251. Laming, L. C. Thermal Conductance of Machined Metal Contacts // International Developments in Heat Transfer Conference: Proceedings of the 1961– 1962 Heat Transfer Conference, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1962, pp. 65– 76.

252. Tachibana, F. Study on Thermal Resistance of Contact Surface // Nihon Kikai Gakukai Shi, Vol. 55, 1952, pp. 102– 107 (in Japanese), translated by Redstone Scientific Information Center, RSIC-29, June 1963.

253. Shlykov, Y. P., and Ganin, Y. A. Thermal Resistance of Metallic Contacts // International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 7, No. 8, 1964, pp. 921– 929.

254. Shlykov, Y. L. Calculation of Thermal Contact Resistance of Machined Metal Surfaces // Teploenergetika, Vol. 12, 1965, pp. 102– 108.

255. Veziroglu, T. N. Correlation of Thermal Contact Conductance Experimental Results // AIAA Paper 67-317, April 1967.

256. Tien, C. L., “A Correlation for Thermal Contact Conductance of Nominally Flat Surfaces in Vacuum,” Proceedings of the 7th Conference on Thermal Conductivity, National Bureau of Standards, Special Publication 302, 1968, pp. 755– 759.

257. Fletcher, L. S., and Gyrogo, D. A. Prediction of Thermal Contact Conductance Between Similar Metal Surfaces // AIAA Paper 70-852, June 1970.

258. Mal'kov, V. A. Thermal Contact Resistance of Machined Metal Surfaces in a Vacuum Environment // Heat Transfer—Soviet Research, Vol. 2, No. 4, 1970, pp. 24– 33.
259. Thomas, T. R., and Probert, S. D., Correlations for Thermal Contact Conductance in Vacuo // Journal of Heat Transfer, Vol. 94, No. 3, 1972, pp. 276– 281
260. O'Callaghan, P. W., and Probert, S. D. Thermal Resistance and Directional Index of Pressed Contacts Between Smooth Non-Wavy Surfaces // Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 16, No. 1, 1974, pp. 41– 55.
261. Popov, V. M., Concerning the Problem of Investigating Thermal Contact Resistance // Power Engineering (NY), Vol. 14, No. 3, 1976, pp. 158– 163.
262. Madhusudana, C. V., and Fletcher, L. S., Solid Spot Thermal Contact Conductance of Zircaloy-2/Uranium Dioxide Interfaces // Nuclear Science and Engineering, Vol. 83, 1983, pp. 327– 332.
263. Song, S., and Yovanovich, M. M., Relative Contact Pressure: Dependence on Surface Roughness and Vickers Microhardness // Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 2, No. 1, 1988, pp. 43– 47.
264. Greenwood, J. A., and Williamson, J. B. P. Contact of Nominally Flat Surfaces // Proceedings of the Royal Society of London, A295, 1966, pp. 300– 319.
265. Onions, R. A., and Archard, J. F. The Contact of Surfaces Having a Random Structure // Journal of Physics, D: Applied Physics, Vol. 6, No. 2, 1973, pp. 289– 304.
266. Bush, A. W., Gibson, R. D., and Thomas, T. R. The Elastic Contact of a Rough Surface // Wear, Vol. 35, 1975, pp. 87– 111.
267. Blahey, A., Tevaarwerk, J. L., and Yovanovich, M. M. Contact Conductance Correlations of Elastic Deforming Flat Rough Surfaces // AIAA Paper 80-1470, June 1980
268. Mikic, B. B., and Rohsenow, W. M. Thermal Contact Conductance // Mechanical Engineering Dept., Massachusetts Inst. of Technology, TR 4542-41, NASA Contract NGR 22-009-065, Cambridge, MA, Sept. 1966.

269. Yovanovich, M. M. Thermal Contact Correlations // Spacecraft Radiative Transfer and Temperature Control, edited by T. E. Horton, Vol. 83, Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, New York, 1982, pp. 83– 95.
270. Clausing, A. M., and Chao, B. T., Thermal Contact Resistance in a Vacuum Environment, Journal of Heat Transfer, Vol. 87, No. 3, 1965, pp. 243– 251.
271. Mikic, B. B. Thermal Constriction Resistance Due to Non-Uniform Surface Conditions; Contact Resistance at Non-Uniform Interface Pressure // International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 13, No. 10, 1970, pp. 1497– 1500.
272. Roca, R. T., and Mikic, B. B. Thermal Conductance in a Bolted Joint // AIAA Paper 72-282, April 1972.
273. Burde, S. S., and Yovanovich, M. M. Thermal Resistance at Smooth-Sphere/Rough-Flat Contacts: Theoretical Analysis // AIAA Paper 78-871, May 1978.
274. Nishino, K., Yamashita, S., and Torii, K. Thermal Contact Conductance Under Low Applied Load in a Vacuum Environment // Proceedings of the 1st International Conference of Aerospace Heat Exchanger Technology (Palo Alto, CA), edited by R. K. Shah and A. Hashemi, Elsevier, Amsterdam, 1993, pp. 763– 788.
275. Greenwood, J. A., and Tripp, J. H. The Elastic Contact of Rough Spheres // Journal of Applied Mechanics, Vol. 34, No. 1, 1967, pp. 153– 159.
276. Tsukada, T., and Anno, Y. On the Approach Between a Sphere and a Rough Surface: 1st Report; Analysis of Contact Radius and Interface Pressure) // Journal of the Japanese Society of Precision Engineering, Vol. 45, No. 4, 1979, pp. 473– 479 (in Japanese).
277. Bahrami M, Culham JR, Yovanovich MM, et al. Thermal contact resistance of nonconforming rough surfaces, part 2: thermal model. // J Thermophys Heat Transf 2004; 18: 218–227.
278. Antonetti VW, Whittle TD, Simons RE. An approximate thermal contact conductance correlation. // J Electron Packag 1993; 115: 131–134.

279. Zheng J, Li Y, Wang L, et al. An improved thermal contact resistance model for pressed contacts and its application analysis of bonded joints. *Cryogenics* 2014; 61: 133–142.
280. Bahrami M, Yovanovich MM, Culham JR. Thermal joint resistances of nonconforming rough surfaces with gas-filled gaps. *J Thermophys Heat Transf* 2004; 18: 326–332
281. Gou JJ, Ren XJ, Dai YJ, et al. Study of thermal contact resistance of rough surfaces based on the practical topography. *Comput Fluids* 2018; 164: 2–11.
282. Somé SC, Delaunay D, Faraj J, et al. Modeling of the thermal contact resistance time evolution at polymer–mold interface during injection molding: effect of polymers' solidification. *Appl Therm Eng* 2015; 84: 150–157.
283. Shojaeefard M, Tafazzoli K. Numerical investigation of thermal contact conductance between linear and curvilinear contacts. *Scientia Iranica* 2018; 26: 1293–1298.
284. Martins JM, Neto DM, Alves JL, et al. Numerical modeling of the thermal contact in metal forming processes // *Int J Adv Manuf Technol* 2016; 87: 1797–1811.
285. Wang H, Liu Y, Cai Y, et al. Fractal analysis of the thermal contact conductance for mechanical interface // *Int J Heat Mass Transf* 2021; 169: 120942.
286. Liu J, Ma C, Gui H, et al. Thermal contact conductance modeling of tapered roller/groove interface. *SSRN Electron J. Epub ahead of print* 2022.
287. A. M. Ross, R. L. Stouten Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario (Canada), «Heat transfer coefficient between UO<sub>2</sub> and Zircaloy-2». 1962. 73 P.
288. B. Miki'c, Thermal contact conductance; theoretical considerations, *Int. J. Heat Mass Transf.* 17 (2) (1974) 205–214.
289. M.M. Yovanovich, New contact and gap conductance correlations for conforming rough surfaces, in: *AIAA 16th Thermophysics Conference*, AIAA Paper, Palo Alto, CA, 1981, pp. 1–6.
290. Majumdar, A., and Tien, C. L. Fractal Network Model for Contact Conductance // *Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, Aug. 1991, pp. 516– 525.



291. M. Bahrami, M.M. Yovanovich, J.R. Culham, Thermal contact resistance at low contact pressure: effect of elastic deformation, *Int. J. Heat Mass Transf.* 48(16) (2005) 3284–3293.
292. J. Zheng, et al., An improved thermal contact resistance model for pressed contacts and its application analysis of bonded joints, *Cryogenics* 61 (2014) 133–142.
293. J. Zhang, et al., A fractal model for predicting thermal contact conductance considering elasto-plastic deformation and base thermal resistances, *J. Mech. Sci. Technol.* 33 (1) (2019) 475–484.
294. H.T. Wang, et al., Fractal analysis of the thermal contact conductance for mechanical interface, *Int. J. Heat Mass Transf.* 169 (2021).
295. Kennedy F E, Cullen S C *Trans ASMS Journal Tribology* 111 21 (1988)
296. Kuhlmann-Wiesdorf D *ASMS Journal of Tribology* 109 (1987)
297. Xu J, Fisher T S *Proceedings of the Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electric Systems ITherm 2* (2004) p. 549
298. Fletcher L. S. *Journal of heat transfer* 110 (1988)
299. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник (Пер. с англ. под ред. Г В Степанова) (М.: Радио и связь, 1982)
300. Викулов Д. Г., Меснянкин С. Ю. в сб. Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену: В 8 томах 8 (М.: изд-во МЭИ, 2006)
301. Eid J. C., Antonetti V. W. *Proceedings of the 8th international heat transfer conference San Francisco, CA* (1986) p. 659
302. Меснянкин С. Ю. Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену: В 8 томах 7 (М.: изд-во МЭИ, 1998)
303. Blondel C. et al. *Cryogenics* 29 5 (1989)
304. J. Zheng et al. *Cryogenics* 80 1 (2016)
305. Свириденко А. И., Чижик С. А., Петроковец М. И. Механика дискретного фрикционного контакта (Минск: Наука и техника, 1990)

306. Меснянкин С. Ю. в сб. Труды 5 Минского международного форума по тепломассообмену 2005 24-28 мая (Минск: изд-во ИТМО, 2004, электронная версия)
307. Меснянкин С. Ю., Мясников С. С. Современные фундаментальные проблемы контактного теплообмена в теплонапряженных установках // Труды 15 Школы-семинара молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» 2005 23-27 мая Калуга: Т 2 М.: Издательский дом МЭИ, 2005, с 308-311
308. Меснянкин С. Ю. IV Минский международный форум по тепломассообмену ММФ 2000, том 3, Теплопроводность и задачи оптимизации теплообмена (Минск, 2000) с. 363
309. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.. Качество поверхности и контакт деталей машин. - М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
310. Демкин Н.Б.. Контактное шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970, 228 с.
311. Витенберг Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки (Л.: Судостроение, 1971)
312. Nayak P. R. Journal of Lubrication Technology. 93. 3 (1971)
313. Семенюк Н. Ф. Сиренко Г. А. Трение и износ. 1. 6 (1980)
314. Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей, теоретико-вероятностный подход (М.: Наука, 1971)
315. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение контактной жёсткости соединений (М.: Наука, 1977)
316. Рудзит Я. А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей (Рига: Зинатне, 1975)
317. Огар П. М., Корсак И. И. Влияние характеристик тяжело нагруженного стыка шероховатых поверхностей на герметичность (Братск: БрИИ, 1989)
318. Измайлов В. В., Новоселова М. В. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования 8 2015

319. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин (М.: Машиностроение, 1966)
320. Осипов А. П. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки 16 (2002)
321. Пашовкин С. А. Известия ВУЗ. Машиностроение. 12 (2008)
322. Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твёрдых тел. УФН т.179, 2009, 945–970 с
323. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. М.: Высш. шк., 1990, 207 с.
324. Шлыков Ю. П., Расчет термического сопротивления контакта обработанных металлических поверхностей. - // Теплоэнергетика, 1965, .N 10, с. 79-82
325. Negus K.J., Yovanovich M.M., Thompson J.C., AIAA Paper AТАА-1985-1014(1985)
326. Дунин-Барковеккий И. В., Кэрташова А. Н- Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
327. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхностей и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
328. ГОСТ Р 70117-2022 Шероховатость поверхности. Рекомендации по выбору
329. ГОСТ Р 71448-2024 Оптика и фотоника. Шероховатость поверхности. Параметры и типы направлений неровностей поверхности.
330. Мухин В.С., Смыслов А.М., Боровский С.М. Методика выполнения измерений параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73 при помощи приборов профильного метода МИ 41-75. М.: Изд-во стандартов, 1975.
331. Batista C Y P, Romaguera-Barcelay Y, Matos R S, et al. Morphology, microstructure, and electrocatalytical properties of sol-gel spin-coated Bi<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>Ba (TiO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> thin films. Applied Surface Science, 2023, 615: 156374.

332. Macek W. Correlation between fractal dimension and areal surface parameters for fracture analysis after bendingtorsion fatigue. *Metals*, 2021, 11(11): 1790.
333. Matos R S, Ferreira N S, Țălu Ș, et al. Percolative, Multifractal, and Symmetry Properties of the Surface at Nanoscale of Cu-Ni Bimetallic Thin Films Deposited by RF-PECVD. *Symmetry*, 2022, 14(12): 2675.
334. Zelati A, Mardani M, Rezaee S, et al. Morphological and multifractal properties of Cr thin films deposited onto different substrates. *Microscopy Research and Technique*, 2023, 86(2): 157-168.
335. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий.
336. *Fractals: Form, Chance and Dimension*, by Benoît Mandelbrot; W H Freeman and Co, 1977; 365 P.
337. A Ari, S Akbulut. Effect of fractal dimension on sand-geosynthetic interface shear strength. *Powder Technology*, 2022, 401: 117349.
338. I Moradi, M Irannajad. Fractal dimension of crushing products: effects of feed size distribution and feed rate. *Particulate Science and Technology*, 2021, 39(7): 877-886.
339. R Wang, A K Singh, S R Kolan, et al. Fractal analysis of aggregates: Correlation between the 2D and 3D box-counting fractal dimension and power law fractal dimension. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2022, 160: 112246.
340. M Beretta-Piccoli, C Cescon, A Vistarini, et al. Motor unit synchronization and firing rate correlate with the fractal dimension of the surface EMG: A validation study. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2023, 167: 113021.
341. S Teles, A R Lopes, M B Ribeiro. Galaxy distributions as fractal systems. *The European Physical Journal C*, 2022, 82(10): 896.
342. Țălu Ș, Abdolghaderi S, Pinto E P, et al. Advanced fractal analysis of nanoscale topography of Ag/DLC composite synthesized by RF-PECVD. *Surface Engineering*, 2020, 36(7): 713-719.
343. Maddren J, Marschall E *Journal of Spacecraft Rockets* 32 3 (1995)

344. Pinto E P, Matos R S, Pires M A, et al. Nanoscale 3D spatial analysis of zirconia disc surfaces subjected to different laser treatments. *Fractal and Fractional*, 2023, 7(2): 160.
345. B B Mandelbrot, J W Van Ness. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM review*, 1968, 10(4): 422-437.
346. A Majumdar, B Bhushan. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. *Journal of Tribology, ASME*, 1991, 113(1): 1-11.
347. S Izquierdo, C I López, J R Valdés, et al. Multiscale characterization of computational rough surfaces and their wear using self-affine principal profiles. *Wear*, 2012, 274: 1-7.
348. Y Xia, J Cai, W Wei, et al. A new method for calculating fractal dimensions of porous media based on pore size distribution. *Fractals*, 2018, 26(01): 1850006.
349. Y Liu, Y Wang, X Chen, et al. Two-stage method for fractal dimension calculation of the mechanical equipment rough surface profile based on fractal theory. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, 104: 495-502.
350. S R Nayak, J Mishra. An improved method to estimate the fractal dimension of colour images. *Perspectives in Science*, 2016, 8: 412-416.
351. W Li, L Yang, Y Qiu, et al. FFP: joint Fast Fourier transform and fractal dimension in amino acid property-aware phylogenetic analysis. *BMC bioinformatics*, 2022, 23(1): 347.
352. B J Florio, P D Fawell, M Small. The use of the perimeter-area method to calculate the fractal dimension of aggregates. *Powder technology*, 2019, 343: 551-559.
353. M Zou, B Yu, Y Feng, et al. A Monte Carlo method for simulating fractal surfaces. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 386(1): 176-186.
354. M Ausloos, D H Berman. A multivariate Weierstrass–Mandelbrot function. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1985, 400(1819): 331-350.
355. X Tian, A Todoroki, T Liu, et al. 3d printing of continuous fiber reinforced polymer composites: Development, application, and prospective.

Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022: 100016.

356. K Komvopoulos, N Ye. Three-dimensional contact analysis of elastic-plastic layered media with fractal surface topographies. J. Trib., 2001, 123(3): 632-640.

357. X Shi, C Cai, P Bao, et al. Influence of Ship-based Vibration on Characteristics of Arc and Droplet and Morphology in Wire Arc Additive Manufacturing. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2023, 2(1): 100067.

358. K H Kamilov, A Zaitov, A Tulaganov. On a formula finding fractal dimension. Archives of Materials Science and Engineering, 2020, 104(1)19-22.

359. L. Zhong, F Zeng, G Xu. Comparison of fractal dimension calculation methods for channel bed profiles. Procedia Engineering, 2012, 28: 252-257.

360. A S Balankin, B Mena. Vector differential operators in a fractional dimensional space, on fractals, and in fractal continua. Chaos, Solitons & Fractals, 2023, 168: 113203.

361. D Blackmore, G Zhou. A new fractal model for anisotropic surfaces. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(5-6): 551-557.

362. Инженерный анализ в Ansys Workbench / Учебное пособие. В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. -271 с.: ил.

363. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.

364. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 541 с.

365. G. Gao, et al., A thermal contact model encompassing near-field effects of multiinterface TEGs in hypersonic conditions, Int. J. Heat Mass Transf. 216 (2023) 124543.

366. Y.Q. Xian, et al., Re-estimation of thermal contact resistance considering nearfield thermal radiation effect, Appl. Therm. Eng. 157 (2019) 113601.

367. M. Chen, Q. Li and P. Zhang Experimental investigation of high temperature thermal contact resistance of thin disk samples using infrared camera in vacuum condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 157 (2020) 119749
368. Siegal R and Howell J R *Thermal Radiation Heat Transfer*. Second Edition. Hemisphere Publishing Corporation. 1981.
369. Y.M. Xuan , Q. Li , P. Zhang , Measurement method and instrument of thermal contact resistance at high temperature, *Scientia SINIA Technologica* 49 (5) (2019) 491–500 .
370. L. Xing , L.W. Zhang , X.Z. Zhang ,Experimental investigation of contact heat transfer at high temperature based on steady-state heat flux method, *Exp. Heat Transf.* 23 (2) (2010) 107–116 .
371. Викулов А.Г., Викулов Д.Г., Меснянкин С.Ю., Фельдман А.Ю. Экспериментальное исследование электронной проводимости контакта алюминиевых материалов при наличии поверхностных нанопленок. *Теплофизика высоких температур*. 2015. Т. 53. № 1. С. 39.
372. Зеодинов М.Г., Костановский А.В., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Контактное электрическое сопротивление графита марки мпг-7 при постоянном и переменном токе. *Теплофизика высоких температур*. 2022. Т. 60. № 5. С. 789-792.
373. Авдучевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
374. Маталин А.А., Рысцова В.С. Чистота поверхностей деталей, подвергаемых покрытиям.-Л.:Машгиз,1952.-112 с.
375. Миллер, В.С. Эффективный способ уменьшения контактного термического сопротивления // *Инженерно-физический журнал*. 1963. №4. С. 71-74
376. C. T. Merrill & S. V. Garimella Measurement and Prediction of Thermal Contact Resistance Across Coated Joints // *Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*. 2011. N24:2, 179-200

377. Bapurao Kshirsagar. Thermal contact conductance of silicon nitride-coated ofhc copper contacts // *Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*.- 2010 N 16:4, 273-279 P.
378. Vincent w. Antonetti & m. Michael Yovanovich. Using Metallic Coatings to Enhance Thermal Contact Conductance of Electronic Packages // *Heat Transfer Engineering* – 1988 - N9:3, 85-92 P
379. Харитонов, В.В. Влияние теплопроводности поверхностного слоя на контактное термическое сопротивление // *Атомная энергия*. 1974.-т. 36.- Вып. 4.-С. 308-310
380. Попов В.М., Ерин О.Л., Тиньков А.А., Швырёв А.Н. Контактный теплообмен в соединениях с малотеплопроводными заполнителями // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2013. Т. 9. №2. С. 95–97.
381. Крючков А.Е. К определению контактных термосопротивлений (КТС) в соединениях с окисленными поверхностями [Текст] // *Наука и технологии. Краткие сообщения 27 российской школы*. Миасс: УроРАН. 2007. Сер. 2. С. 89-90
382. Yan-Jun Daia , Jian-Jun Goub , Xing-Jie Rena , Fan Baia , Wen-Zhen Fanga , Wen-Quan Taoa A test-validated prediction model of thermal contact resistance for Ti-6Al-4V alloy // *Applied Energy* Volume 228, 15 October 2018, Pages 1601-1617
383. Попов В.М., Ерин О.Л., Новиков А.П., Кондратенко И.Ю. Теплообмен через тонкослойные прослойки в зоне контакта металлических поверхностей // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т. 7. №6. С. 37–39.
384. Ерин О. Л., Попов В. М., Тиньков А. А. Терморегулирование в теплонапряженных технических системах с составными элементами // *МНИЖ*. 2012. №7-1 (7).
385. Попов В.М. Контактный теплообмен в измерительной технике // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т. 7. № 2. С. 45–47.



386. В.М. Попов, АА. Карпов, П.А. Емельяненко Проблемы контактного теплообмена в теплонапряженных системах лесного комплекса // Лес. Наука. Молодежь - 2009: материалы по итогам научно-исследовательской работы молодых ученых ВГЛТА за 2008-2009 гг. Воронеж, 2009. Т. 1. С. 147-149.

387. Мальков В.А. Влияние покрытий и прокладок из мягких металлов на контактное термическое сопротивление // Инженерно-физический журнал. - 1969. - Т. 17. - № 5. - С. 871 - 879.

388. В.П. Тихомиров, В.И. Воробьев, М.А. Измеров, Н.Н. Стрекалов, А.А. Пугачев. Уменьшение теплового сопротивления между корпусом силового полупроводникового прибора и его радиатором. // Транспортное машиностроение. 2017, № 2 (55), С. 104-112.

389. В. В. Иванов, Л. В. Карасева. Радиационно-конвективный нагрев многослойных тел при идеальном и неидеальном тепловых контактах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. № 4(196). С. 34-37.

390. Латынин А.В., О.Л. Ерин. Терморегулирование в теплонапряженных конструкциях энергетических установок // Тинчуринские чтения: материалы докладов 5й международно-молодежной научной конференции. Казань, 2010. Т. 2. С 230-231

391. Ильченко, О.Т. Термическое сопротивление контактного слоя // Изв. высших учебных заведений. Энергетика. 1958. №9. С. 77-89.

392. Гайорог Д.А Исследование теплоизоляционных материалов для контактирующих поверхностей // В кн. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов. - М.: Мир, 1974. - С. 234 - 258.

393. Айбиндер С.В. Влияние наполнителей на теплофизические, механические и антифрикционные свойства полимеров // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. техн. наук. 1983. № 5. С. 3-18.

394. Бочоришвили М.М. Усовершенствованный метод расчета теплоконтактного сопротивления металлических поверхностей // Тр. ГПИ. Тбилиси. 1975. № 5. С. 23-29.

395. С. Ю. Меснянкин Методы расчета и регулирования контактного теплового сопротивления // Сборник научных трудов «Тепловое проектирование систем». - 1990 , С. 78-86
396. V. Gopal, M.J. Whiting, J.W. Chew and S. Mills, Thermal contact conductance and its dependence on load cycling, International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 66, November 2013, Pages 444-450
397. Hamidreza Sadeghifar, Ned Djilali, Majid Bahrami, Thermal conductivity of a graphite bipolar plate (BPP) and its thermal contact resistance with fuel cell gas diffusion layers: Effect of compression, PTFE, micro porous layer (MPL), BPP out-of-flatness and cyclic load; Journal of Power Sources 273 (2015) 96-104
398. Reji Joseph, Jophy Peter, S. Sunil Kumar, N. Asok Kumar, Effect of thermal and load cycle on thermal contact conductance across dissimilar joints at cryogenic temperature, Applied Thermal Engineering xxx (2016) xxx–xxx
399. Reji Joseph, Asok Kumar N, S Sunil Kumar, Role of rectification and hysteresis in controlling thermal contact conductance across joints at low temperatures, Cryogenics 124 (2022) 103488
400. B. Facchini, F. Simonetti, L. Tarchi, R. Abram, M. Maritano, Measurement of Thermal Contact Conductance of a Heat Shield for Gas Turbine Combustors in a Realistic Test Rig Set-Up, Conference: ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition
401. Ежов А.Д. Тепловые процессы в контактных соединениях жидкостных ракетных двигателях малой тяги. М.: МАИ, 2017. 180 с.
402. Ruifeng Dou, Qiuhao Li, Cheng Zhu, Rongzhao Zhang, Zhi Wena, Xunliang Liu, Experimental study on the enhancement of contact heat transfer by micro fin, International Journal of Heat and Mass Transfer 134 (2019) 482–488
403. Xing-Jie Ren, Yan-Jun Dai, Jian-Jun Gou, Wen-Quan Tao, Experimental study on thermal contact resistance of needle-punched c/c-sic composites at different temperatures and pressures, Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16 August 10-15, 2018, Beijing, China
404. T.Helmig, T.Göttlich, R.Kneer, An infrared thermography based experimental method to quantify multiscale thermal resistances at non-conforming interfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer 186(3) (2022)

405. Wen-Xiao Chu, Po-Hsiang Tseng, Chi-Chuan Wang, Utilization of low-melting temperature alloy with confined seal for reducing thermal contact resistance, *Applied Thermal Engineering* 163 (2019) 114438
406. P.G. Siddappa , Andallib Tariq, Contact area and thermal conductance estimation based on the actual surface roughness measurement, *Tribology International* 148 (2020) 106358
407. Qingyun Tang, Jingjing He, Weifang Zhang, Influencing factors of thermal contact conductance between TC4/30CrMnSi interfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 86 (2015) 694–698
408. Surya Kumar, Andallib Tariq, Determination of thermal contact conductance of flat and curvilinear contacts by transient approach, *Experimental Thermal and Fluid Science* 88 (2017) 261–276
409. Попов В.М., Новиков А.П., Полянский Р.Н., К вопросу снижения теплонапряженности двигателей внутреннего сгорания, *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика* 7(43) (2018) 92-97
410. В.В. Стулин, Решение задачи циклического контактного теплообмена для системы двух плоских тел при инициировании теплоты деформации, *Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Технические науки*. 2017. № 3 (55)
411. Syed M.S. Wahid, C.V. Madhusudana, Thermal contact conductance: effect of overloading and load cycling, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 4139–4143
412. Wen-Xiao Chu, Mahesh Khatiwada, Chi-Chuan Wang, Investigations regarding the influence of soft metal and low melting temperature alloy on thermal contact resistance, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 116 (2020) 104626
413. Starikov P., Ionov A.V., Seliverstov S., Borovik I.N., Matushkin A.A. Mathematical modeling of heat transfer processes in a wall with a regular pseudo-pore structure / *Lecture Notes in Electrical Engineering*. — 2019. — Т. 549. — С. 155-168.
414. Marchukov, Evgenii & Egorov, Igor & Popov, Grigorii & Goriachkin, Evgenii & Novikova, Yulia & Zubanov, Vasilii. (2019). Increase of Efficiency of

Axial Uncooled Turbine by Optimization of Its Blades Shape Using CFD and Optimization Software. 10.2514/6.2019-4092.

415. Bhushan B. (1998) Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact / B. Bhushan // Tribology Lett. 4, 1-35.

416. Найак П.Р.. Применение модели случайного поля для исследования шероховатости поверхности // Труды американского общества инженеров-механиков. 1971. Сер. №3. С305-333

417. Семенюк Н.Ф. Сиренко Г.А.. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля. // Трение и износ -1980. –Т.1. - № 6. С. 1010 - 1020

418. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Минаев В.А. Количественная оценка адсорбционного слоя комбинированного диэтилдитиокарбамата на халькопирите и арсенопирите методом измерения параметров рельефа поверхности // Цветные металлы. 2018. № 7. С. 27–32. DOI: 10.17580/tsm.2018.07.04.

419. Zheng et al. Measurements of interfacial thermal contact conductance between pressed alloys at low temperatures. Cryogenics, Volume 80, Part 1, 2016, 33-43

420. Sadeghifar H., Djilali N., Bahrami M. Thermal conductivity of a graphite bipolar plate (BPP) and its thermal contact resistance with fuel cell gas diffusion layers // Journal of Power Sources. 2015. Vol. 273. P. 96–104.

421. Rosochowska M., Chodnikiewicz K., Balendra R. A new method of measuring thermal contact conductance // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 145, № 2. P. 207–214.

422. Wang Z., Zhang W., Tang Q. Experimental Investigation of Thermal Contact Conductance Across GH4169/GH4169 Interface with Compensation Heater // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2011. Vol. 42, № 8. P. 1572–1575.

423. Zhang P., Cui T., Li Q. Effect of surface roughness on thermal contact resistance of aluminium alloy // Applied Thermal Engineering. 2017.

424. Bi D., Chen H., Ye T. Influences of temperature and contact pressure on thermal contact resistance at interfaces at cryogenic temperatures // Cryogenics. 2012. Vol. 52, № 7–9. P. 403–409.

425. Dou R., Ge T., Liu X. et al. Effects of contact pressure, interface temperature, and surface roughness on thermal contact conductance between stainless steel surfaces under atmosphere condition // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 94. P. 156–163.
426. Fieberg C., Kneer R. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51, № 5–6. P. 1017–1023.
427. Smith A.N., Hostetler J.L., Norris P.M. Thermal boundary resistance measurements using a transient thermoreflectance technique // *Microscale Thermophysical Engineering*. 2000. Vol. 4, № 1. P. 51–60.
428. Pelzl J., Chotikaprakhan S., Dietzel D. et al. The thermal contact problem in nano- and micro-scale photothermal measurements // *The European Physical Journal Special Topics*. 2008. Vol. 153, № 1. P. 335–342.
429. Болотов А.Н., Рачишкин А.А., Сутягин О.В. Компьютерное моделирование физических взаимодействий технических поверхностей на микроуровне // *Программные продукты и системы*. 2019. № 1 (32).
430. Дорняк О.Р., Попов В.М., Анашкина Н.А. Математическое моделирование контактного термического сопротивления для упругодеформируемых твёрдых тел методами механики многофазных систем // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92, № 5. С. 1156–1165.
431. Liu J., Ma C., Wang S. Thermal contact conductance between rollers and bearing rings // *International Journal of Thermal Sciences*. 2020. Vol. 147. P. 106140.
432. Verma N.N., Mazumder S. Quantifying the effect of asperity size and shape on thermal contact conductance of metal-metal contacts through direct numerical simulations // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 115. P. 336–346.
433. Panagouli O.K., Margaronis K., Tsotoulidou V. A multiscale model for thermal contact conductance of rough surfaces under low applied pressure // *International Journal of Solids and Structures*. 2020. Vols. 200–201. P. 106–118.
434. Миллер Б.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. Киев: Наукова думка, 1966. 132 с.

435. Zhan L.-H., Li X.-Q., Hu S.-C. Modelling for thermal contact resistance of frictional interface under high temperature and high pressure // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2002. Vol. 12, № 3. P. 489–493.

436. Bauzin J.G., Laraqi N. Experimental determination of the thermal contact resistance and the local heat partition coefficient at the interface of two solids in dry friction // Proc. 12th Int. Heat Transfer Conf. 2002. P. 51–56.

437. Ногачева Т.Н., Семина Е.В. Математическая модель зоны трения при контроле температуры по термо-ЭДС // Контроль. Диагностика. 2001. № 11. С. 22–24.

438. Jacobs R. B., Starr C. Thermal conductance of metallic contacts.— «The Review of Scientific Instruments», 1939, vol. 10, № 4, p. 140—141.

439. Schauer D. A., Giedt W. H. Contact conductance measurement during transient heating. The third Internat. Heat Transfer Conf. Chicago. 1966, vol. IV, p. 100—108.

440. Мучиик Г. Ф., Меерович И. Г. Нестационарная теплопроводность в системах твердых тел, находящихся в контакте. // Теплофизика высоких температур, т. 1, 1963, , № 3, с. 404—408.

441. Меерович И. Г., Керцелли И. Ю. Простой метод нагрева с постоянной скоростью. // Теплофизика высоких температур т. 3, 1965, № 5, с. 802—804.

442. K. Woodbury, H. Najafi, F. de Monte, J.Beck. Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems. John Wiley & Sons, Inc., 2023, 324 pp, doi:10.1002/9781119840220.

443. О. М. Алифанов. Обратные задачи теплообмена // М.: Машиностроение, 1988. - 279с.

444. О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, А.В. Ненарокомов. Идентификация математических моделей сложного теплообмена / М. : Изд-во МАИ, 1999. - 267 с.

445. Vikulov A.G., Nenarokomov A.V., Identification of the Emissivity and Thermal Resistance of Screen-Vacuum Thermal Insulation in a Mathematical

Model of Heat Transfer with Lumped Parameters// High Temperature. - 2020 - №1  
- Volume 58 - P. 112-120

446. Ясницкий Л. Н. Введение в искусственный интеллект // М.: Издат. центр «Академия», 2005. — 176 с.

447. S.J.D. Prince. Understanding deep learning // MIT press, 2023, 541 p.

448. M. Raissi, P. Perdikaris, G.Em. Karniadakis. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019 vol.378: pp.686–707. doi:10.1016/j.jcp.2018.10.045.

449. E. Hamidreza, T. Mojtaba, S. Philipp, V. Ricardo. Physics-informed neural networks for solving Reynolds-averaged Navier–Stokes equations // Physics of Fluids vol. 34, no.075117, 2022, doi:10.1063/5.0095270

450. M. Raissi,; A. Yazdani, ; G.Em. Karniadakis. Hidden fluid mechanics: Learning velocity and pressure fields from flow visualizations //Science. vol.367 (no.6481): pp. 1026–1030. 2020, doi:10.1126/science.aaw4741

451. Kuzenov, V.V., Ryzhkov, S.V. and Varaksin, A.Yu., The Adaptive Composite Block-Structured Grid Calculation of the Gas-Dynamic Characteristics of an Aircraft Moving in a Gas Environment, Mathematics, vol. 10, 2130, 2022.

452. M.Abadi et al. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems, 2015. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4724125>

453. Zhan T, Fang L, Xu Y. Prediction of thermal boundary resistance by the machine learning method[J]. Sci Rep, 2017, 7(1): 7109.

454. Vu A. T, Gulati S, Vogel P A, et al. Machine learning-based predictive modeling of contact heat transfer. [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 174: 121300.

455. Ren X J, Gou J J, Dai Y J, et al. Exploring thermal contact conductance between two contact solids by artificial neural network. [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 136: 106182.

456. Li Y, Shi Y, Wang X, et al. Thermal and electrical contact resistances of thermoelectric generator: Experimental study and artificial neural network modelling. [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120154.