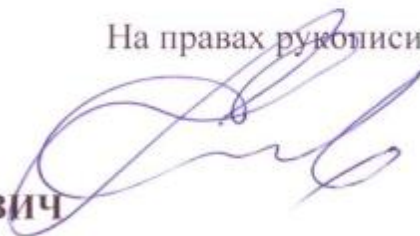


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи

ЕЖОВ АЛЕКСЕЙ ДМИТРИЕВИЧ



**ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
В КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 01.04.14

«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Меснянкин Сергей Юрьевич

Москва - 2017

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Классификация соединений и тепловых воздействий в жидкостных ракетных двигателях малой тяги.....	15
Глава 2. Состояние вопроса по исследованию процессов теплопередачи через соприкасающиеся поверхности.....	19
Глава 3. 3-х мерное моделирование соприкасающихся поверхностей	30
3.1. Параметры микротопографии поверхности.....	30
3.2. Моделирование поверхности.....	35
3.3. Метод конечных элементов применительно к шероховатости поверхности.	44
Глава 4. Расчетно-аналитический метод определения контактного термического сопротивления.	48
4.1. Прочностной расчет.	48
4.2. Тепловой расчет.....	56
4.3. Контактное термическое сопротивление при наличии среды в зоне контакта.	62
Глава 5. Экспериментальное исследование тепловых процессов в контактной зоне.....	67
5.1. Анализ известных конструкций экспериментальных установок.....	67
5.2. Обоснование выбранной схемы и ее конструктивные особенности....	69
5.3. Система измерения.....	72
5.3.1. Датчик силы сжатия.....	72
5.3.2. Измерение температуры.....	74
5.3.3. Станция сбора данных.....	74
5.4. Методика проведения эксперимента.....	76
5.5. Обработка результатов эксперимента.....	78
5.6. Оценка точности результатов эксперимента.....	79
5.7. Результаты эксперимента.	80
Глава 6. Практическая реализация научных решений.....	83
6.1. Расчет тепловых процессов в конструкциях жидкостных ракетных двигателей малой тяги.....	83
6.1.1 Камера сгорания с возможностями изменения геометрии	83

соединений.....	
6.1.2. Разработка расчетной модели.....	84
6.1.3 Установка граничных условий и обоснование параметров.....	86
6.1.4. Решение термо-прочностной задачи.....	89
6.1.5. Рекомендация по совершенствованию контактного узла.....	96
6.1.6 Расчет усовершенствованной геометрии.....	99
6.2. Расчет контактного термического сопротивления в областях контакта деталей.	111
6.2.1. Экспериментальное определение параметров шероховатости контактирующих плоскостей.....	111
6.2.2. Численное моделирование смещения поверхностей контакта.....	116
6.2.3. Численное моделирование температурных полей.....	120
6.3. Расчет теплонапряженного состояния конструкции малой камеры сгорания с учетом значения КТС между соприкасающимися деталями....	127
6.4.1 Камера сгорания с возможностью изменения материала прижимного кольца.....	133
6.4.2 Сеточная модель расчета анализируемой конструкции.....	134
6.4.3. Решение тепло-прочностной задачи.....	135
6.5. Рекомендации по оптимизации теплонагруженных контактных соединений.....	146
Заключение.....	148
Список сокращений и условных обозначений.....	150
Список литературы.....	153
Приложения.....	165

Введение

Современная наука и техника позволяет конструкторам авиационной и ракетной промышленности разрабатывать наиболее эффективные конструкции, которые зачастую содержат в себе множество элементов сложной формы из материалов с самыми различными свойствами. Широкое распространение в этом направлении получили композиционные материалы из углерода и карбида кремния. Преимущество этих материалов заключается в ряде их свойств, таких как высокая температура плавления, низкий термический коэффициент линейного расширения, малая теплопроводность. Применение этих материалов имеет и ряд недостатков, например, высокий модуль упругости поперек слоев композиционного материала и низкий коэффициент Пуассона, которые обуславливают быстрое разрушение при внешнем механическом нагружении.

В этой связи конструктора прибегают к использованию дорогостоящих прецизионных сплавов с заданными теплофизическими свойствами, довольно часто используются с механически прочными и термостойкими композиционными материалами. Применительно к ракетно-космическим системам, композиционные материалы весьма перспективны при проектировании камер сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРД МТ)[1-3], характерная конструкция которой представлена на рисунке 1. [1]

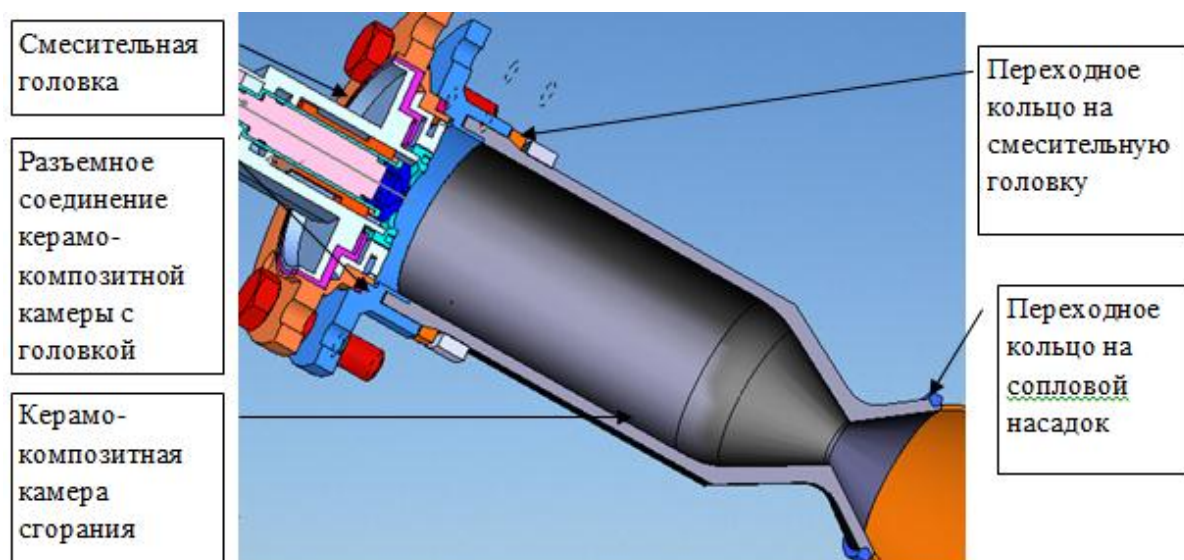


Рис. 1 - Модель ЖРДМТ МАИ-202К-200-ОК с композиционной камерой сгорания

Среди зарубежных конструкций подобного рода можно выделить конструкцию отображенную на рисунке 2. [3]

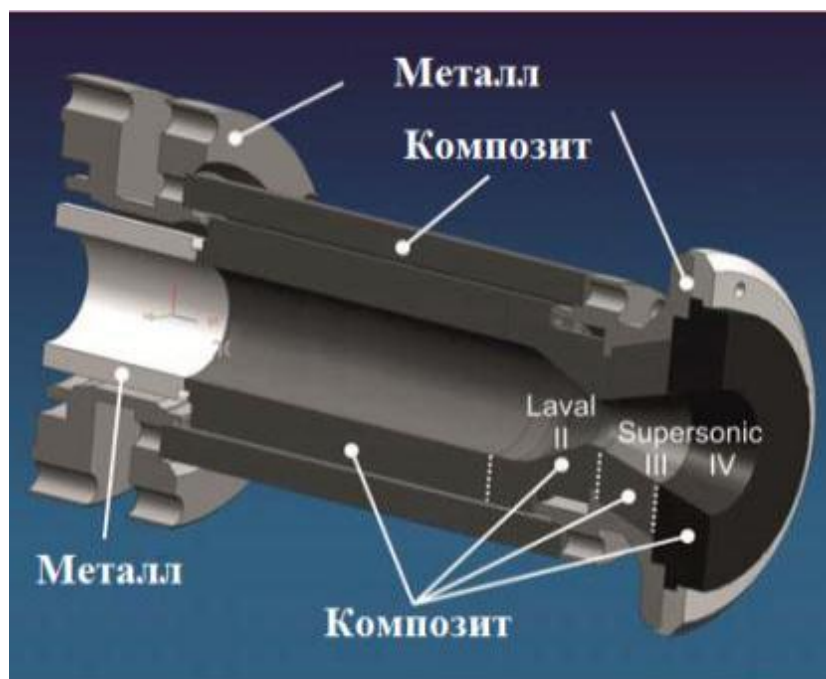


Рис.2 – Камера сгорания двигателя ST-5

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 [4-7].

Ввиду сложности решении 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. [8-14]

Таким образом, важнейшей задачей связанной с повышением эффективности и надежности разрабатываемых конструкций является анализ теплового контактирования шероховатых поверхностей в обоих направлениях: моделировании микротопографии поверхности для контактного анализа и исследовании процессов теплопередачи через соприкасающиеся поверхности, что в конечном итоге позволило сформировать целостную картину исследований и предложить методику прогнозирования КТС.

Актуальность темы диссертационной работы

Продиктована необходимостью достоверного определения теплового и напряженно-деформированного состояния конструкции типовых жидкостных

ракетных двигателей малой тяги с элементами из композиционных материалов, находящихся в контакте с металлическими поверхностями. Таким образом, разработанная методика определения температурных полей и напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом значения контактного термического сопротивления (КТС), позволяет на начальном этапе проектирования учесть основные проблемные зоны, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и внести коррективы в конструкцию, сократить сроки испытаний и отработки изделия и создать более надежную конструкцию.

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

Цель работы

Исследование тепловых процессов в контактных соединениях теплонапряженных конструкций жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Разработка инженерной методики численного моделирования теплообмена и напряженно-деформированного состояния изделия с учетом влияния контактного термического сопротивления.

Для достижения цели решались следующие задачи

- Изучение особенностей передачи теплоты в типовых конструкционных элементах жидкостных ракетных двигателей малой тяги.
- Разработка универсальной методики определения контактного термического сопротивления для новых типов материалов применяемых в современном двигателестроении, базирующейся на вычислении значения контактного термического сопротивления по данным микрогеометрии соприкасающихся поверхностей в соответствующих контактных парах.
- Предложение технического решения связанного с заменой материалов отдельных элементов, позволяющее снизить эквивалентные напряжения конструкции в целом, и на этой основе увеличить срок службы и повысить надежность разрабатываемых жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

Научная новизна работы

Впервые предложена методика определения контактного термического сопротивления на базе 3-х мерного моделирования сопрягаемых поверхностей реальных конструкций. Впервые комплексно решена тепловая задача на основе которой анализируется механическое нагружение в реальных неидеальных теплонагруженных соединениях жидкостных ракетных двигателей малой тяги с учетом значения термического сопротивления. Вносятся рекомендации по изменению применяемых конструктивных решений за счет разработанных методик численного моделирования теплового и механического состояния жидкостных ракетных двигателей малой тяги в результате нагрева камеры сгорания из углерод-углерод композиционных материалов с учетом значений контактного термического сопротивления в узлах контакта.

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается:

- совпадением предложенной методики определения КТС на «традиционных» материалах с результатами аналитических решений по формулам полученным в результате обобщения экспериментальных данных.
- совпадением результатов численного моделирования с результатами проведенного натурного эксперимента.

Практическая и теоретическая значимость работы заключается в том, что предложенные методики позволяют достаточно точно определить температурные поля и соответствующее им напряженно-деформированное состояние конструкции жидкостных ракетных двигателей малой тяги с учетом значений контактного термического сопротивления между соприкасающимися деталями с учетом неидеальности соединения. Это в свою очередь позволяет найти значения межконтактного давления, и провести оптимизацию геометрии для отдельных высоконагруженных узлов. Такой подход позволяет уже на начальном этапе выявить основные проблемы, которые могут возникнуть в

процессе эксплуатации и, в итоге, значительно сократить сроки испытаний и отработки изделия.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы численного моделирования процессов механики деформируемого тела и теплопроводности, реализованные на базе пакета ANSYS.

Основная особенность предлагаемого метода состоит в том, что он в полной мере учитывает состояние контактирующих поверхностей при расчете теплового и механического взаимодействий деталей и узлов ЖРДМТ, обеспечивая при этом необходимую точность расчетов.

Следствием этого является достоверное прогнозирование жизненного цикла ЖРДМТ на этапе проектирования, что в конечном итоге позволяет внести соответствующие коррективы в конструкцию и повысить её надежность.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 180 страницах печатного текста и состоит из шести глав, введения, заключения и списка литературы.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы доложены на научно-технических конференциях Всероссийского и международного уровня:

- Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике» (Москва 2014, 2015),
- XI Международная конференция пользователей ANSYS/CADFEM, (Москва 2014),
- 13-я, 14-я, 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва 2014, 2015, 2016),
- Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва 2014, 2015),

- XXXIX Академические чтения по космонавтике (Москва 2015),
- 6-я и 7-я научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Тольятти 2015, 2016),
- Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении» (Москва 2015),
- XLII, XLIII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» , (Москва 2016, 2017),
- XV Минский международный форум по тепло- и массообмену, (Минск, 2016),
- XI Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта 2016)

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 20 работ.

Публикации включенные в перечень ВАК :

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., 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 .
3. Ежов А.Д. Определение контактного термического сопротивления пары: композиционный материал C-Si-C и титановый сплав // Труды МАИ. 2015. N 82. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/34e/ezhov_rus.pdf
4. 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.

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.

Авторские свидетельства:

6. 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.

Публикации в других изданиях

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.269-270.
20. Ежов А.Д. Методика определения межконтактного объема и пятен фактического контакта соприкасающихся поверхностей энергоустановок. // Сборник тезисов докладов XLIII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». Москва. МАИ. 05-19 апреля 2017. С.1008.

Положения выносимые на защиту

Математическая модель контактного термического сопротивления для определения реального напряженно-деформированного состояния конструкции.

Механизм переноса теплоты в контактирующих теплонагруженных узлах различной формы и геометрии применительно к конструкции жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

Личное участие соискателя

- Разработка методики численного моделирования контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями, включающая в себя анализ тепловых процессов в контактных парах различных материалов на микроуровне с последующим описанием этих процессов методом конечных элементов;
- Создание методики расчета напряженно-деформированного состояния жидкостных ракетных двигателей малой тяги с учетом значения контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями;
- Проектирование и сборка экспериментальная установка по определению контактного термического сопротивления в воздухе;
- Проведение и анализ результатов экспериментальных данных.

Краткое содержание работы

В первой главе приведена основная классификация соединений и тепловых воздействий в контактных соединениях жидкостных ракетных двигателей. Предложена систематизация основных определяющих факторов контактной

проводимости в зависимости от соединений и условий контактирования. Обоснована роль контактного термического сопротивления в конструкции ЖРД.

В главе 2 представлен аналитический обзор литературы. Рассмотрены статьи, диссертации и материалы конференций отечественных и зарубежных авторов по тематике моделирования шероховатости поверхности и определения контактного термического сопротивления.

В главе 3 проведено экспериментальное определение параметров шероховатости поверхности контактирующих образцов и на базе этих параметров создан алгоритм для построения твердотельной модели шероховатости.

В главе 4 представлена систематизация процессов происходящих в контактной области соединений характерных для жидкостных ракетных двигателях малой тяги, показано влияние макро- и микрогеометрии на протекание тепловых процессов, оценена роль межконтактной прослойки.

В главе 5 проанализированы известные экспериментальные методы исследования тепловых процессов в контактной зоне. Представлены основные узлы разработанной экспериментальной установки по определению контактного термического сопротивления. Описана методика проведения эксперимента, приведены результаты опытов.

В главе 6 приведена практическая реализация научных решений на примере расчета напряженно-деформированного состояния композитных камер сгорания двух типоразмеров с учетом контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями, сформированы рекомендации по оптимизации теплонагруженных контактных соединений как за счет изменения конструктива исследуемой геометрии, так и за счет изменения параметров шероховатости поверхности.

Глава 1. Классификация соединений и тепловых воздействий в жидкостных ракетных двигателях малой тяги

При создании высоконагруженных энергетических установок и особенно жидкостных ракетных двигателей одним из основных факторов, влияющих на надежность и безаварийность работы, является обеспечение максимальной герметичности всех его соединений. Наличие не герметичности в соединениях может привести к утечкам компонентов топлива и генераторного газа, что в конечном итоге приведет к пожару в двигательном отсеке и выходу из строя всего летательного аппарата. Соответственно, соединения узлов и агрегатов должны обладать максимальной герметичностью при достаточно напряженных условиях работы в течение всего жизненного цикла изделия.

Условно, соединения узлов и агрегатов жидкостных ракетных двигателей малой тяги можно подразделить на разъемные (разборные) и неразъемные (неразборные) [15].

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. 1.1., *а* и *б*) обеспечивается обжатием прокладки при стягивании фланцев с помощью болтов или шпилек, при этом на поверхности прокладки создается требуемое контактное давление.

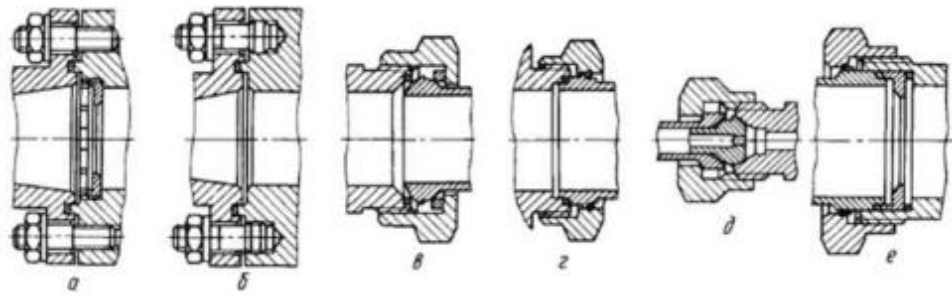


Рис.1.1. –Фланцевые соединения жидкостных ракетных двигателей малой тяги

Герметичность резьбовых ниппельных соединений (Рис. 1.1, 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 [4-7], и от того насколько достоверно оно рассчитано зависят дальнейшие действия разработчиков.

К неразъемным соединениям относятся сварные и паяные соединения. Из сварных соединений (Рис. 1.2. 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.

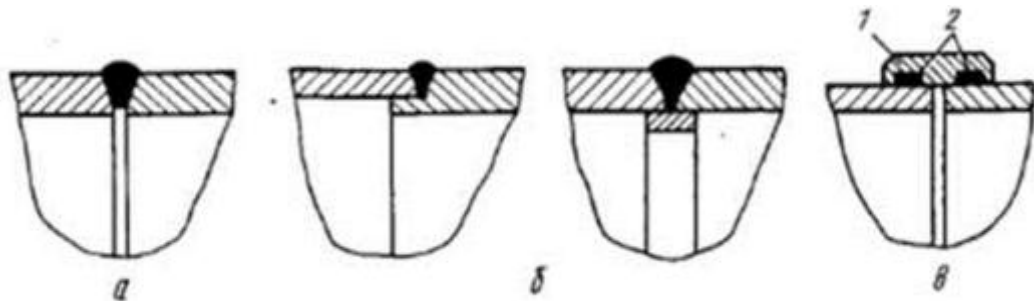


Рис.1.2 – Сварные соединения ЖРД

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 блокировке теплового потока и перегреву изделия.

Паяные соединения (Рис. 1.2., 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, паяные, сварные соединения). Поскольку в большинстве случаев контакт в соединениях является дискретным, то происходит стягивание и удлинение линий теплового потока к контактным 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.

Глава 2. Состояние вопроса по исследованию процессов теплопередачи через соприкасающиеся поверхности.

Исследованию процессов теплопередачи через соприкасающиеся поверхности посвящено достаточно много работ как зарубежных, так и отечественных [4-80]. Следует отметить, что большинство исследователей проводят работы в совершенно разных, но тесно связанных областях. Анализируя доступные статьи и материалы конференций, можно прийти к выводу, что лишь малая часть авторов проводит полный термо-механический расчет соприкосновения шероховатых поверхностей. Большое число работ посвящено моделированию контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, расчету площади фактического касания и межконтактного объема, но в статьях посвященных расчету и прогнозированию КТС об этих работах мало что указывается, либо совсем не указывается.

Применительно к жидкостным ракетным двигателям, вопрос теплового контактирования деталей рассмотрен крайне слабо, несмотря на то, что при протекании высокоинтенсивных тепловых потоков, через контакт двух материалов, сильно различающихся как по коэффициенту линейного расширения так и микротопографии поверхности, является достаточно сложным процессом, требующим достоверного определения состояния всей конструкции в целом на всем участке работы двигателя. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что данный вопрос является одним из актуальных на данный момент.

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 [16] для электрических контактов и распространенной им на тепловые соединения, в которой обобщаются результаты его публикаций, начиная с [17]. Тем не менее в процессе переноса энергии через контакт тепло- и электропроводностью существуют важные отличия [18]. Отличие процессов теплопроводности от электропроводности состоит в трудности управления распространением теплоты. Применяемые в ракетном двигателестроении материалы допускают изменение электрической проводимости до 14 порядков, в то время как теплопроводность меняется лишь на 4 порядка [19]. Так же существует ряд различий между электрической емкостью и теплоемкостью [20]. Электрический контакт также имеет следующие особенности:

- при уменьшении пятна контакта при малой фактической площади контакта на пятне происходит значительное джоулевое тепловыделение и происходит резкий локальный скачок температуры. Температура может возрасти на десятки и сотни градусов по сравнению с температурой внутри тела [21]. Это может привести к локальному расплавлению металла, изменению его механических свойств, нарастанию оксидной пленки;

- в зазоре может протекать туннельное движение электронов и образование дуг [22];

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

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:

- термическое сопротивление единичного микроконтакта [23-26], образованного плоской поверхностью и сферой или плоской поверхностью и конусом в вакууме;
- термическое сопротивление многоточечного контакта в вакууме [27], [28];
- термическое сопротивление в контакте твердых тел с учетом поверхностной деформации [29-32];
- номинально плоские шероховатые поверхности [4], [5], [26], [29];
- влияние на контактный теплообмен макрошероховатости и волнистости поверхностей [4,5,30,33-35],.
- численное решение сопряженной задачи контактного теплообмена в системе твердых тел [36-57]
- термическое сопротивление в контакте твердых тел с наличием заполнителя внутри контакта или оксидных пленок [6,58-66]

Отмеченные публикации позволяют сделать вывод, что за последнее время проведен большой 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, что особенно важно для новых материалов, применяемых в конструкциях ЖРДМТ.

Второе направление теоретических работ посвященное описанию контакта микронеровностей взаимодействующих поверхностей в виде одиночного контактирования сферических или конических выступов не внесло существенных решений. Подробный анализ тепловых моделей приведен в работе [67], где внесены отдельные дополнения для частных случаев контактного теплообмена к хорошо известным решениям Ройса и Йовановича [5].

В работе [24] 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 [66] продемонстрировано, что контактное сопротивление определяется не только числом и размерами индивидуальных контактов, а также расстоянием между ними и равномерностью их расположения.

Широкий анализ единичных моделей приведен в работе [67], в которой приводится необходимость рассмотрения сферических элементов, контактирующих между собой. Аналогичный подход реализован и в трудах зарубежных ученых [25], [28], детально рассмотревших тепловые процессы в модельных элементах.

В работах, посвященных изучению крупномасштабных неровностей поверхности, было установлено, что волнистость и отклонение от плоскостности ведут к возрастанию контактного термического сопротивления, а при малых нагрузках влияние волнистости является решающим [34, 35].

В [68] 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.

Несмотря на объем работ, посвященных описанию контакта микронеровностей взаимодействующих поверхностей, все они имеют различного рода допущения и упрощения относительно микрорельефа поверхности, в то время как предлагаемые ими методики являются достаточно затруднительными для инженерных расчетов.

Среди комплексных экспериментальных теоретических работ, помимо уже упомянутых монографий можно выделить публикации посвященных изучению влияния фактической площади касания, теплопроводности материалов контактной пары и среды, заполняющей зазоры, на величину термического сопротивления контакта материалов из сталей X18H9T, 12X18H10T, 45, 30, 1X13, 30ХГСА, меди, алюминия, Д16Т, железа «Армко», молибдена, обработанных по 4-10 классу шероховатости, в диапазоне температур 300...900 К и уровня механической нагрузки 0,1...20 МПа в вакууме, воздухе, среде гелия и аргона. В некоторых зарубежных работах были представлены сведения о материалах, не имеющие аналогов в стандартных отечественных классификациях.

В некоторых публикациях [69-82] содержатся только экспериментальные сведения термической проводимости в контактах перспективных материалов: слоистых, пористых, композиционных [69-72]. Описываются результаты исследований контактных переходов металл-полупроводник [73,74], алюминий-кремний [75], и полупроводник-полупроводник [76]. Приводятся значения контактного термического сопротивления для углерод - углеродных композитов в области низких температур [77] и показывается, что, несмотря на высокую теплопроводность таких материалов, термическое сопротивление в их контактах на два порядка больше, чем у пары медь-медь.

В обзорных работах [4-6], [29], [78,79] выполнено обобщение обширного экспериментального материала, в том числе, известных корреляционных зависимостей [80].

Отмеченное позволяет сделать вывод, что к настоящему времени предложено достаточно большое 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 ЖРД имеют достаточно специфические свойства и изучены в узком диапазоне изменяемых параметров состояния. Таким образом, большинство зависимостей становятся неприменимы для целого ряда задач инженерной практики.

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 эксплуатационные свойства деталей конструкций.

Традиционно микрорельеф контактирующих поверхностей деталей машин рассматривался как случайный процесс. Одним из первых, кто использовал подобный подход был Гринвуд [66], в котором автор анализировал 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 [81-83], отличительной чертой которой являются параметры распределения, выбирающиеся на основе 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 затронуто в области трибологии. Было бы логичным применить знания полученные исследователями в трибологии на явление контактного теплообмена.

В большинстве случаев, микротопография поверхности контакта были смоделированы аналитически, применяя различного вида допущения и упрощения [81-88]. Микрорельеф моделировался в виде различных геометрических форм, поведение одной контактирующей пары микровыступа часто переносились на описание поведения пар взаимодействующих поверхностей. Моделирование контакта микронеровностей взаимодействующих поверхностей в виде 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 [89]. Применяя теорию случайных функций, он ввел ряд расчетных формул для определения параметров шероховатых поверхностей, находящихся в упругом, пластичном и упругопластическом контактировании. Впервые учет взаимного влияния для неровностей, распределенных по высоте, был рассмотрен в работе [90]. где показано, что с ростом взаимного влияния несущая способность стыка шероховатых поверхностей уменьшается.

Немаловажными характеристиками, определяющими контактную прочность, жесткость, термо- и электросопротивление и формирующими силы трения и износа, являются сближение (перемещение одной плоскости касания относительно другой) и фактическая площадь касания, эти характеристики так же 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 [91]. 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 трудоемко и не дает весьма ясного представления о величине сближения, плотности контакта и объеме зазора в стыке. В некоторых случаях для определения этих характеристик пользуются математическим аппаратом опорных кривых [81,90,93-95].

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 [96]. Недостатком данного метода является отсутствие сил трения между смоделированными поверхностями. Этот метод похож на метод конечных элементов, но предложенный в одномерной прямоугольной постановке.

Некоторые авторы [97-99] 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 [37,99].

Необходимо отметить, что методы расчета площади контакта [100-104] между плоскостью со случайно распределённой высотой микровыступов и упругим полупространством имеют ряд недостатков:

- если расчет использует параметры по ГОСТ 2789-73, то зачастую это один параметр, что в ряде случаев вносит существенное отклонение 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 [105].

В работе [99] предлагается высоты микровыступов представить в виде матрицы высот микронеровностей, которая состоит из совокупности векторов, формирующих матрицу поверхности, над которыми в дальнейшем производят ортогональные преобразования с помощью ортогональной матрицы вращения Гивенса. Недостаток данного метода в том, что используются волновые функции для описания шероховатости поверхности, 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 [106-108]. Преимущество данного подхода заключается в том, что фрактальные параметры остаются постоянными на всех масштабах измерения шероховатости и не зависят от длины выборки.

Анализируя существующие подходы, следует отметить, что они трудно применимы для инженерных расчетов, особенно для композиционных материалов, так как либо не обеспечивают необходимую точность расчетов площадей контакта, либо имеют сложный математический аппарат.

Взаимодействие твердых тел с реальной топографией поверхности можно правильно оценить только с учетом микротопографии поверхности, форма которых далека от идеальной [96]. При таком усложнении, а также имея в виду, что процесс контактного взаимодействия в общем случае представляет собой совокупность процессов локального деформирования, происходящих вследствие дискретности контакта, трудности математического характера при нахождении точных и приближенных 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 [38-49,97,109-113]. Впервые использование данного метода было продемонстрировано в работе [114]. 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 материала модели соответствовало распределению материала реальной шероховатой поверхности [81]. В настоящее время микрорельеф поверхности контакта определяется в основном по характеристикам профиля [115]. Для этого созданы приборы и разработаны методики обработки профилограмм [116,117]. В общем случае характеристики микрорельефа шероховатой поверхности не совпадают с характеристиками профиля этой поверхности [118, 119]. Анализ микрорельефа поверхностей продолжает представлять существенные трудности даже при применении предназначенных для этого трехмерных профилографов [120]. 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 [121-124].

Так, например в [99,125,126], предлагаются методы, которые позволяют построить трёхмерную микрогеометрию поверхностей. Но практически во всех известных работах используются волновые функции для описания шероховатости поверхности, что в дальнейшем может существенно сказаться на результатах расчета. Таким образом, 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.

Как видно из анализа литературы, шероховатость поверхности уже давно считается ключевым фактором при решении многих задач теплового, механического и электрического контактирования. 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.

Многочисленные публикации в области прогнозирования КТС и моделирования микро топографии поверхности свидетельствуют об актуальности тематики, её незавершённости и в явном виде невозможности использования имеющихся публикаций при проектировании современных ЖРД. Вместе с тем достижения в области микро топографии 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 дальнейший механический и тепловой анализ. Результатом такой методики является значение КТС в широком диапазоне давлений и температур контактных пар материалов, используемых в многочисленных соединениях современных ракетных двигателей.

Глава 3. 3-х мерное моделирование соприкасающихся поверхностей.

3.1. Параметры микротопографии поверхности.

Как уже отмечалось в разделе 2, поверхности сопрягаемых конструкций никогда не бывают абсолютно гладкими. Различного рода аварии и прочие неполадки в работе машин, особенно двигателей летательных аппаратов, обусловлены неудовлетворительным качеством соединений, а так же не учетом влияния микротопографии поверхности на механические и тепловые свойства контакта, особенно при работе на высоких температурах.

Наличие на твёрдых поверхностях как волнистости, так и шероховатости приводит к стягиванию линий теплового потока. Происходит это поэтапно: сначала в пределах номинальных поперечных сечений линии теплового потока стягиваются к контактному макротягу, вызванному волнистостью, а затем в пределах каждого соединения к микротягу, обусловленным шероховатостью (Рис.3.1) [127].

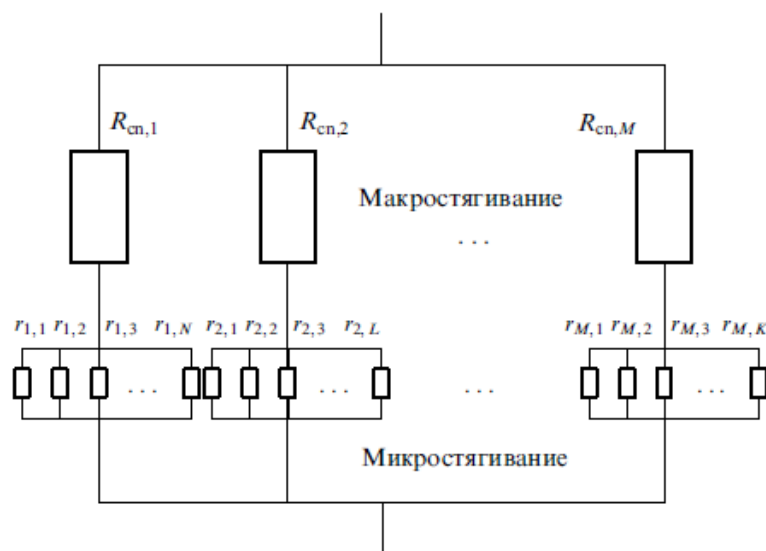


Рис. 3.1. - Структура сопротивления стягивания.

В любых соединениях необходимо знать все характеристики соприкасающихся поверхностей, среди которых в первую очередь надо выделить шероховатость, волнистость и макроотклонения формы.

Под шероховатостью поверхности понимается совокупность микронеровностей с относительно малым шагом, образующих рельеф поверхности и рассматриваемых в пределах участка, длина которого равна некоторой базовой длине l . Шаг микронеровностей меняется в пределах от 2 до 800, а высота 0,03—400 мкм. (ГОСТ 2789-73).

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.

На рисунке 3.2 показаны профилограммы профиля поверхности сделанные в различных направлениях [82]:

- 1—5 — поперечные профилограммы, имеющие одинаковое вертикальное и горизонтальное увеличение, т. е. без искажения формы;
- 6-7 — поперечная и продольная профилограммы с разным увеличением по оси абсцисс и ординат;
- 8 — профилограмма поверхности, имеющей шероховатость и волнистость).

Характеристики шероховатости оценивают преимущественно по профилограммам в пределах стандартизованной базовой длины l . Базовую длину выбирают таким образом, чтобы на ней не проявлялись другие виды неровностей (волнистость и макроотклонения) [128,129].

базовой длины

R_Z - *высота неровностей* - среднее арифметическое абсолютных отклонений находящихся в пределах базовой длины пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов:

R_{max} - *наибольшая высота неровностей профиля* - расстояние между линией выступов и линией впадин в пределах базовой длины.

Свойства исследованного участка профиля наиболее полно отражают параметры R_a , имеющие ясный статистический смысл.

При определении R_Z учитывают всего десять точек профиля; эта величина характеризует профиль весьма условно и применяется по соображениям простоты ее определения.

Параметр R_{max} характеризует границы, в которых меняется высота профиля. ГОСТ 2789—73 в качестве высотных параметров шероховатости рекомендует R_a , R_Z и R_{max} . В ГОСТ 2789—73 введены также характеристики, учитывающие в некоторой степени форму неровностей:

S_m — *средний шаг неровностей профиля* - среднее арифметическое значение длин отрезков средней линии, равных расстоянию между двумя соседними пересечениями ее со средней линией (с положительной производной), в пределах базовой длины;

S — *средний шаг неровностей по вершинам*, равный среднему арифметическому длин отрезков средней линии, равных расстоянию между проекциями на нее двух наивысших точек соседних выступов профиля;

t_p — *относительная опорная длина профиля*, равная отношению суммы длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне p в материале выступов линией, эквидистантной средней, к базовой длине.

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.

Физически обоснованной, а тем более естественной физической границы между шероховатостью и волнистостью поверхности как совокупностью неровностей с шагами, превышающими базовую длину, не имеется.

По рекомендации СЭВ (РС 3951-73) для оценки волнистости поверхности следует учитывать максимальную высоту волнистости W_{max} , среднюю высоту волнистости по десяти точкам W_z , вычисляемые аналогично параметрам R_{max} и R_z шероховатости поверхности, и средний шаг волнистости S_w , определяемой как среднее арифметическое расстояние из пяти значений между волнами на пяти равновеликих отдельных участках измерений волнистости (аналогично шагу S_m для шероховатости).

Однако оценка волнистости только по указанным параметрам в ряде случаев недостаточна. Более полно следует оценивать волнистость по тем же параметрам, что и шероховатость: высотным W_{max} , W_a , W_z , W_p , шаговые S_w , форме неровностей волн r_w , их направлению, опорной длине профиля t_w .

Волны могут образовываться на детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в связи с чем рекомендуется различать продольную и поперечную волнистость. Если первая обычно возникает в результате вибрации технологической системы, то вторая вызывается неравномерностью подачи, неправильной правкой шлифовального круга, неравномерностью его износа и т. д.

Использование основных характеристик шероховатых поверхностей, таких как R_a , R_z , S_m не позволяет определить истинные места контакта соприкасающихся поверхностей, а так же их взаимное расположение в самом контакте. С учётом того, что природа возникновения контактного термического сопротивления для конкретных материалов при фиксированной температуре и давлении зависит от геометрии соприкасающихся поверхностей и взаимного расположения отдельных неровностей, наиболее актуальным для достоверного определения R_K является нахождение реального расположения пятен фактического контакта и изучение механизма стягивания линий теплового потока. Учет перечисленных выше

факторов в конечном итоге позволяет определить величину контактного термического сопротивления.

Очевидно, что достоверное определение контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями, ввиду их дискретного типа соприкосновения, играет существенную роль в определении распределения тепловых потоков и температурного поля конструкции. Задача поиска взаимного расположения двух поверхностей контакта и фактической площади соприкосновения наиболее полно может быть решена объёмном виде. Решение задачи построения трехмерной геометрии контактирующей шероховатой поверхности может быть выполнено по данным, полученным из профилограммы поверхности.

3.2. Моделирование поверхности.

С целью создания методики определения реальных мест контакта натуральных соединений и получения сведений по состоянию поверхностей модельных элементов необходимо выполнить съем профилограммы. Это можно сделать любым прибором, но наиболее целесообразно использовать современный профилометр *Mitutoyo Surftest SJ-210* (рис.3.4), которым и оснащены современные предприятия двигателестроительной отрасли.

Трехмерные модели поверхностных микронеровностей можно получить, смоделировав геометрию поверхности, используя данные полученные с цифрового профилометра.



Рис.3.4 - Профилометр *Mitutoyo SurftestSJ-210*.

Профилометр *Surftest SJ-210* состоит из двух блоков: блока измерения и блока индикации. Блок измерения может быть установлен непосредственно в блок индикации или соединяться с ним кабелем, что позволяет контролировать шероховатость поверхности в труднодоступных местах, таких как внутренняя поверхность трубы; а также устанавливать профилометр непосредственно на деталь при изготовлении. Простой в использовании, легко устанавливается, позиционируется на контролируемой детали. По статистическим данным проводившейся поверки приборов, его погрешность не превышала 5%.

По результатам измерения шероховатости образцов из нержавеющей стали 12X18Н10Т выбиралось среднее значение по трём измерениям. Профилограмма поверхностей с $R_a=0.647$ мкм и $R_a=0.531$ мкм представлены на рисунках 3.5, 3.6.

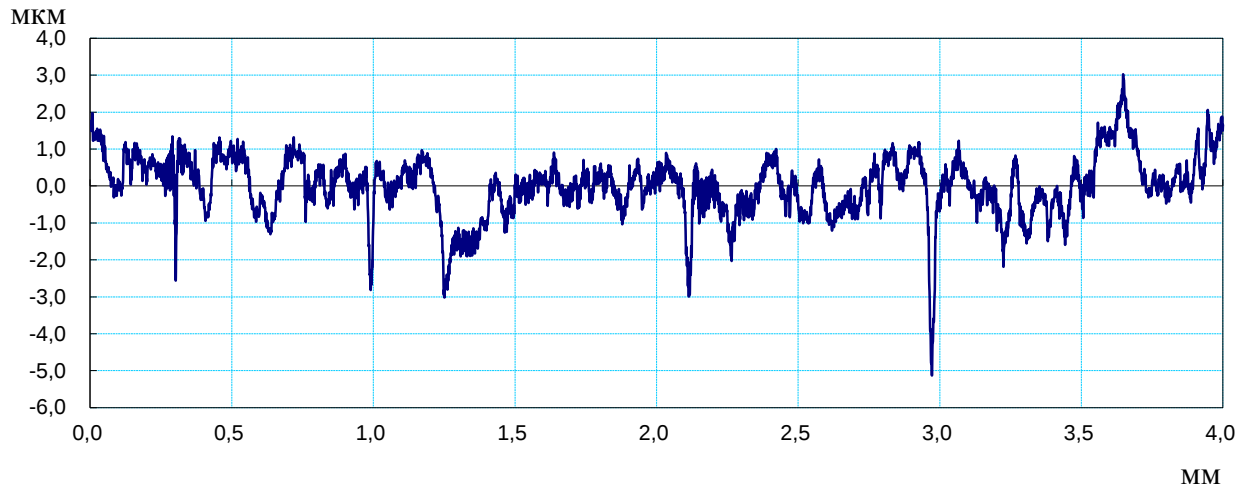


Рис.3.5. – Шероховатость поверхности с $R_a = 0.647$.

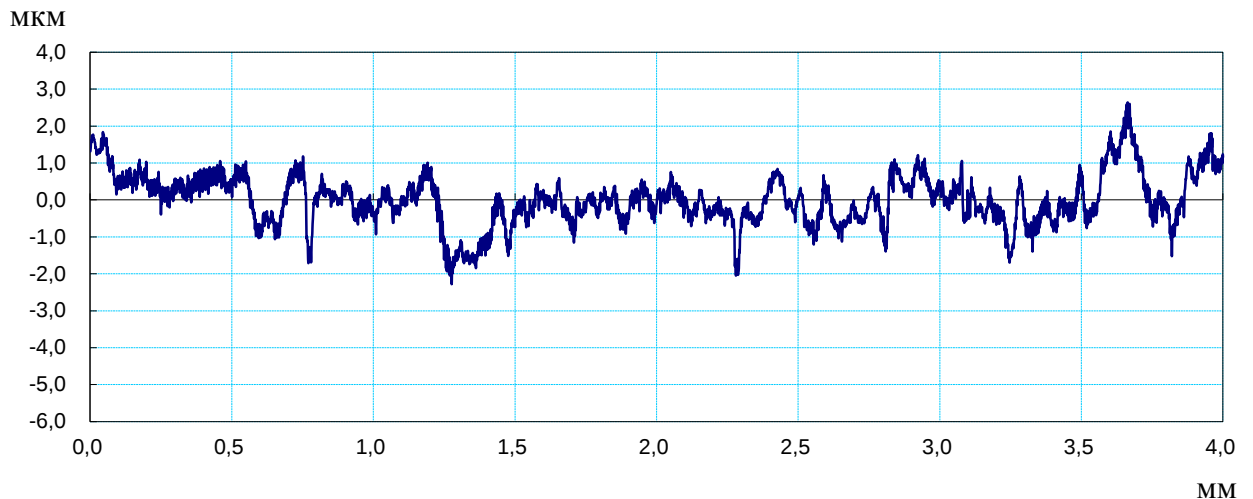


Рис..3.6. – Шероховатость поверхности с $R_a = 0.531$.

При снятии профилограммы поверхности профилометром *Mitutoyo SurftestSJ-210* были 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.3.7).

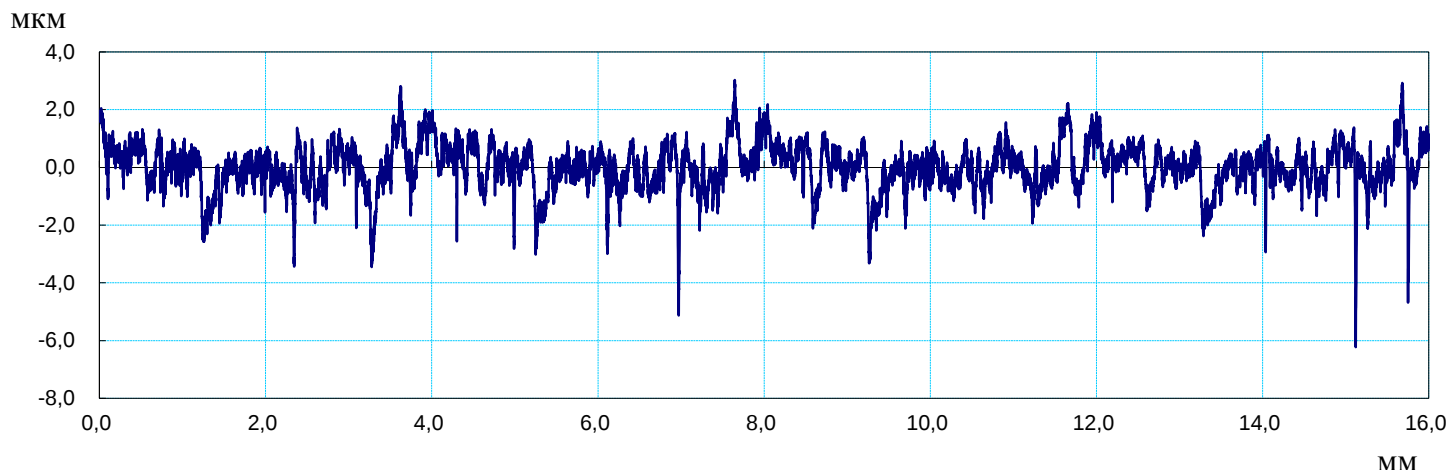


Рис.3.7. – Шероховатость поверхности с $R_q=0.647$ на базовой длине 16мм.

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 выступках и впадинах профиля (рис.3.8)

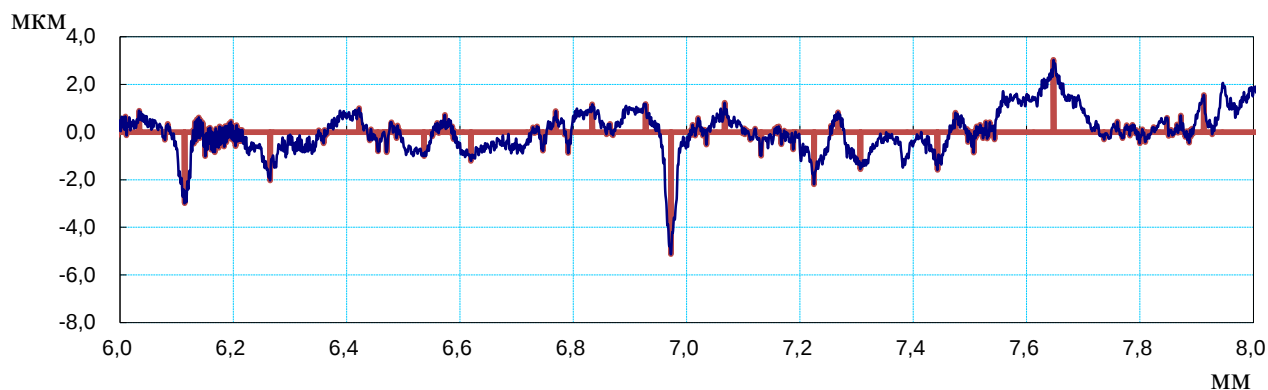


Рис.3.8 – График выступов и впадин шероховатой поверхности.

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

$$S=L/P,$$

где P - количество точек, L –базовая длина.

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

Знание точного распределение высот микровыступов по всей поверхности контакта представляет высокую ценность для расчета контактирования двух шероховатых поверхностей, поскольку именно от начальной площади касания зависит распределение теплового потока в зоне контакта и как следствие температурного напора. Это распределение можно получить из профилограммы поверхности, отсортировав все точки от максимального до минимального значения по высоте микровыступа и обезразмерив значения по базовой длине (Рис. 3.9.), что в дальнейшем дает возможность использовать данное распределение для любых размеров расчетных областей, умножив на требуемую базовую длину.

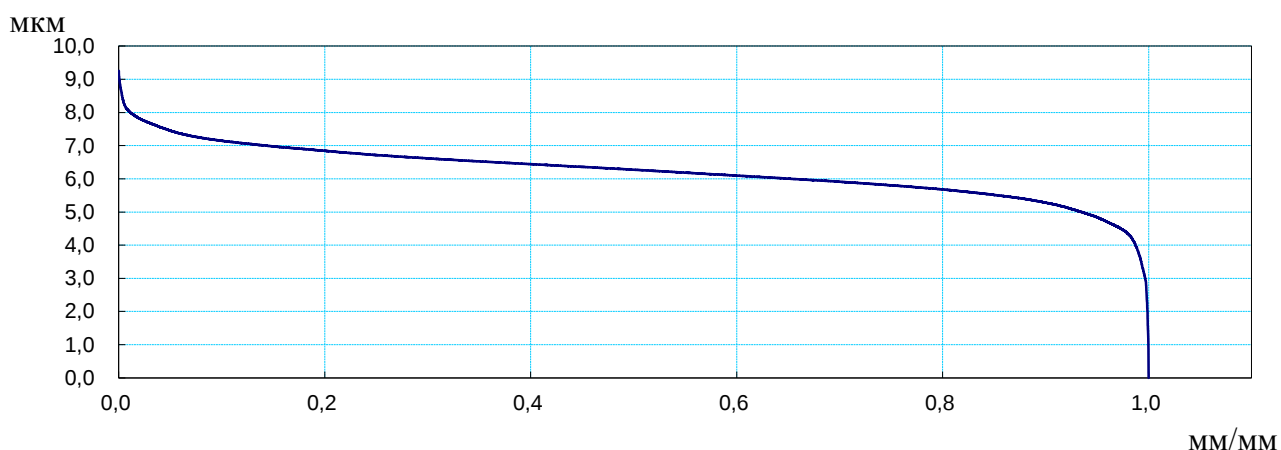


Рис.3.9. – Распределение микровыступов по высоте для образца с $R_a = 0.647$

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 3.10, а текст программы представлен в Приложении.



Рис.3.10. - Алгоритм работы программы

Пример работы программы на языке Фортран представлен на рисунке 3.11.

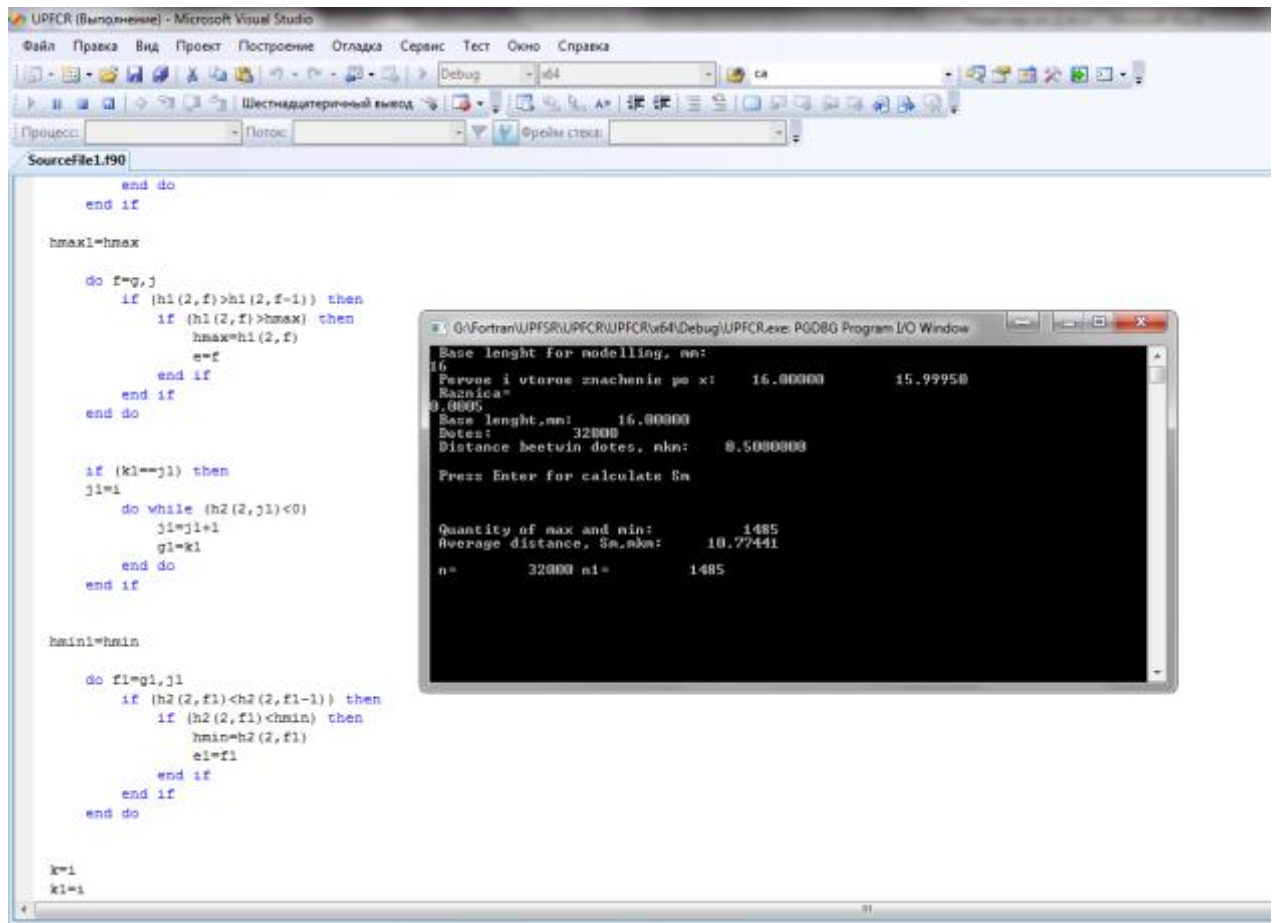


Рис.3.11. – Пример работы программы.

Файлы профилограммы и массива полученных точек выглядят соответственно (Рис.3.12):

Znach.txt — Блокнот					Ra= 0.00 S= 0.01 L= 16.00.txt — Блокнот				
Файл	Правка	Формат	Вид	Справка	Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
16		9.38E-01			10.77441		10.77441		0.8320003
15.9995		9.59E-01			10.77441		21.54882		-0.1250000
15.999		1.06E+00			10.77441		32.32323		-0.2059999
15.9985		1.16E+00			10.77441		43.09764		0.6830001
15.998		1.11E+00			10.77441		53.87205		0.5079999
15.9975		9.24E-01			10.77441		64.64646		-0.1430001
15.997		7.53E-01			10.77441		75.42087		-6.5199852E-02
15.9965		6.91E-01			10.77441		86.19528		-0.2379999
15.996		7.51E-01			10.77441		96.96970		-3.7199974E-02
15.9955		8.49E-01			10.77441		107.7441		0.3280001
15.995		8.71E-01			10.77441		118.5185		-0.1380000
15.9945		7.58E-01			10.77441		129.2929		-1.3299942E-02
15.994		6.51E-01			10.77441		140.0673		0.7430000
15.9935		5.96E-01			10.77441		150.8417		1.3200000
15.993		5.72E-01			10.77441		161.6162		-7.4500084E-02
15.9925		6.07E-01			10.77441		172.3906		0.3590002
15.992		6.73E-01			10.77441		183.1650		0.8200002
15.9915		7.14E-01			10.77441		193.9394		0.3540001
15.991		7.36E-01			10.77441		204.7138		6.0900211E-02
15.9905		7.64E-01			10.77441		215.4882		0.6890001
15.99		8.30E-01			10.77441		226.2626		5.3699970E-02
15.9895		9.03E-01			10.77441		237.0370		0.3779998
15.989		9.18E-01			10.77441		247.8114		1.2600000
15.9885		8.88E-01			10.77441		258.5858		6.6500187E-02
15.988		8.20E-01			10.77441		269.3602		-0.1960001
15.9875		6.88E-01			10.77441		280.1347		4.6500206E-02
15.987		6.07E-01			10.77441		290.9091		-0.1209998
15.9865		6.37E-01			10.77441		301.6835		0.3750000

Рис.3.12 - Файл профилограммы (слева) и массива точек шероховатости (справа)

В дальнейшем, данный массив точек был помещен в среду трёхмерного проектирования SolidWorks, что позволило получить модель шероховатой поверхности методом построения сплайновой поверхности по точкам (Рис.3.13.).

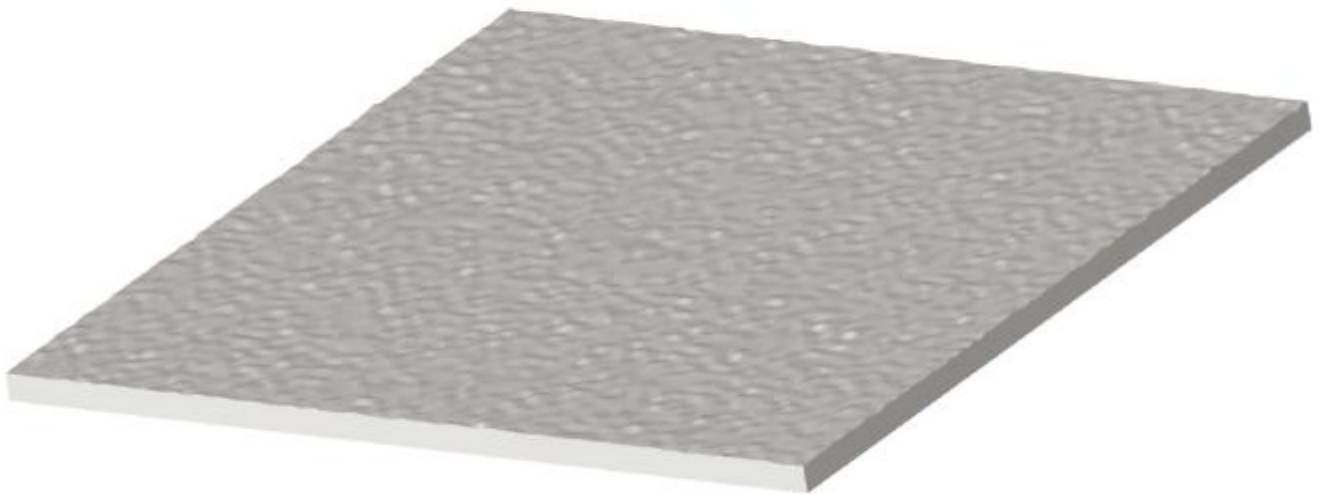


Рис.3.13. – Смоделированная шероховатость поверхности $R_a = 0,647$, $L=1$ мм.

Для контактной задачи моделировалась вторая поверхность с $R_a = 0,53$, которая в дальнейшем помещалась в сборку и сближались относительно поверхностей контакта до интервала 10 мкм (Рис.3.14)

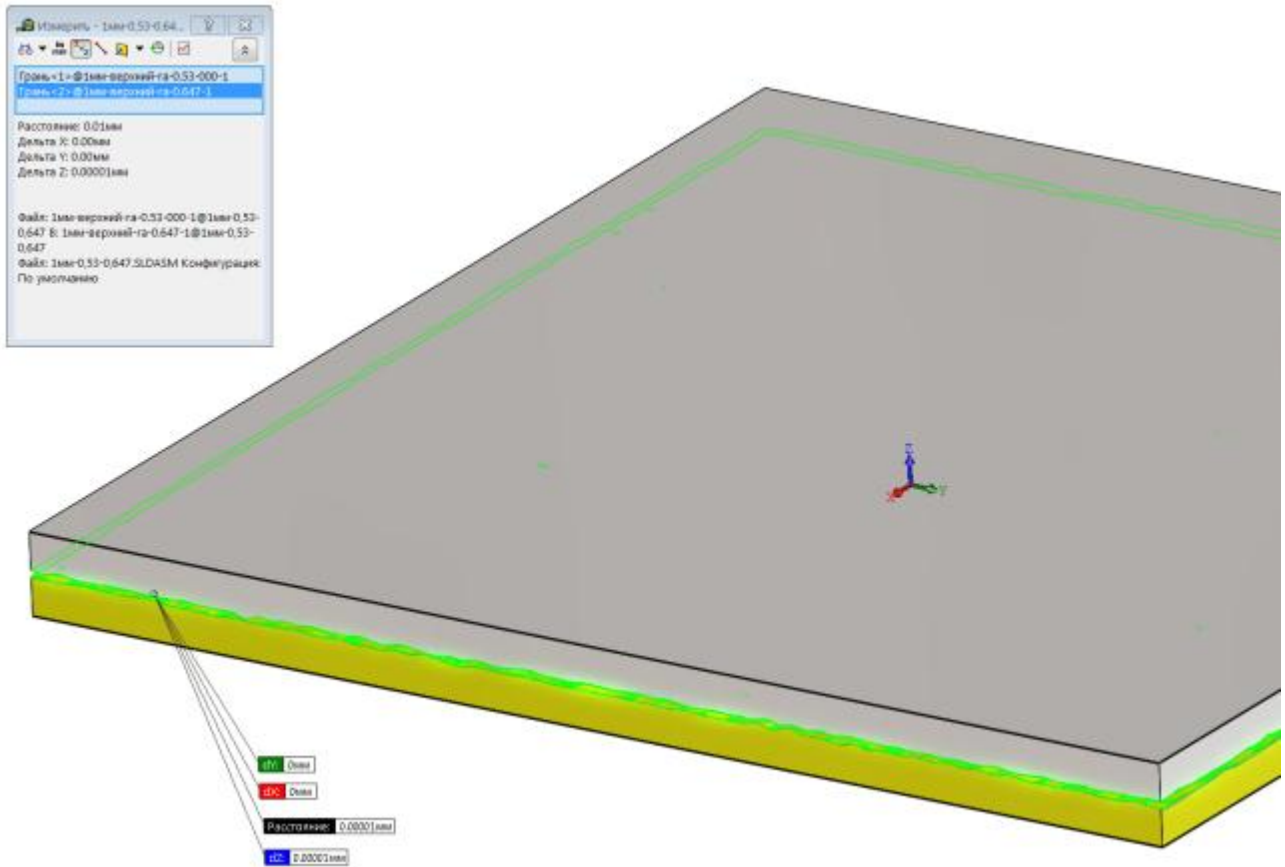


Рис.3.14. – Сближение образцов в контактной области.

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 межконтактного объема.

3.3. Метод конечных элементов применительно к шероховатости поверхности

Суть метода конечных элементов (МКЭ) применительно к шероховатости поверхности сводится к построению расчетной сеточной модели (Рис.3.15.) на основе 3-х мерной твердотельной модели шероховатости поверхности, полученной в результате расчета по предложенному выше алгоритму и решения уравнений.

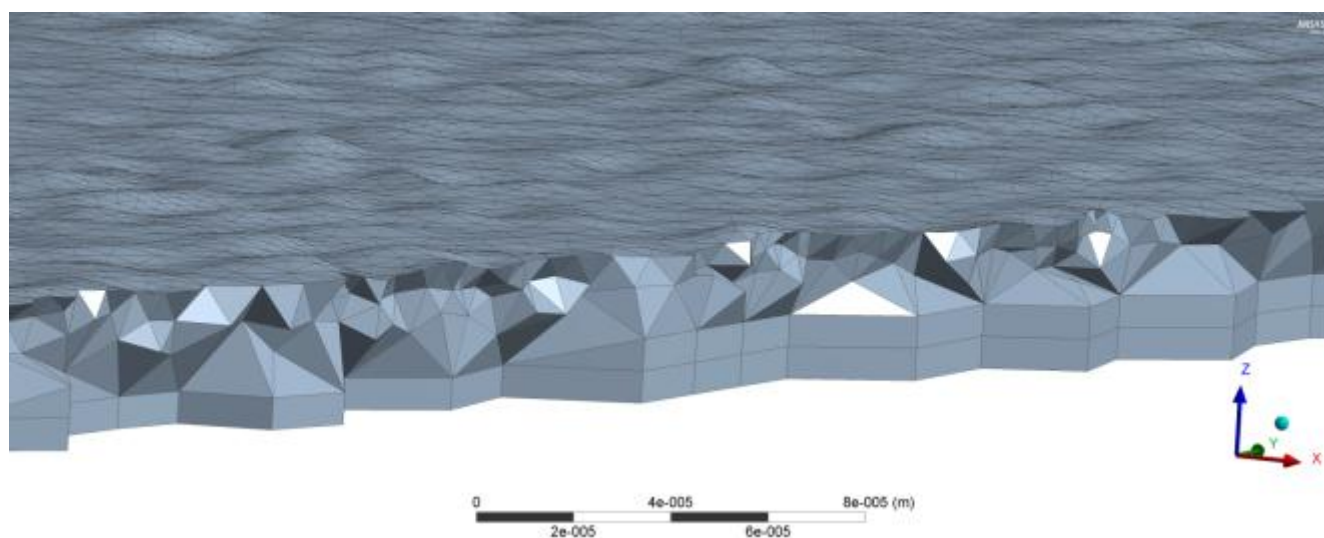


Рис.3.15. - Сеточная модель шероховатости поверхности.

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.3.16). 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.

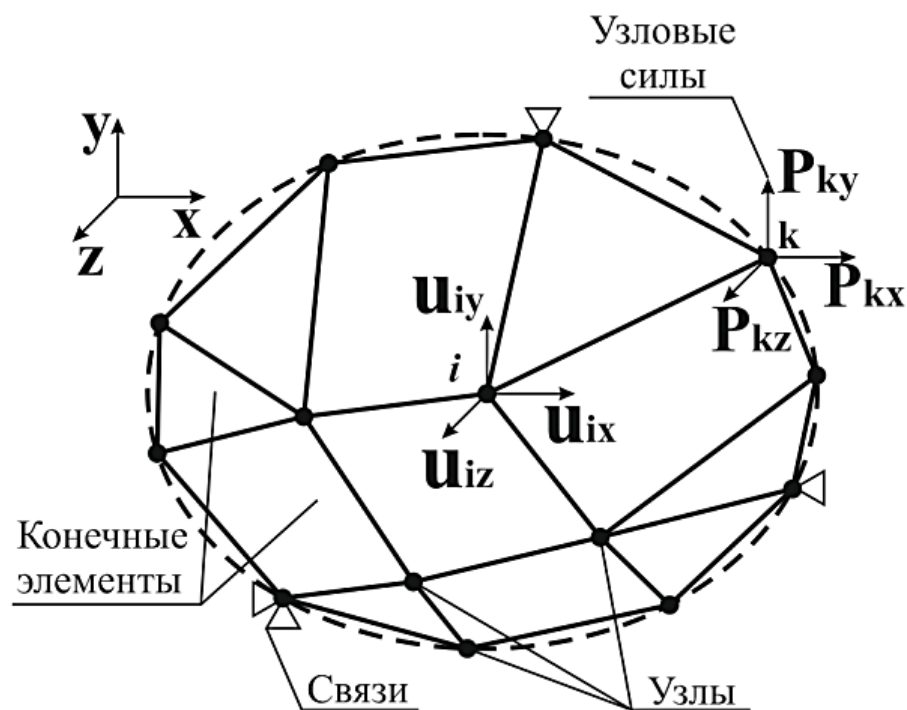


Рис.3.16. - Разбивка тела на конечные элементы.

Рассматриваемая задача рассматривалась как линейно-упругая задача деформирования твёрдого тела при малых деформациях и малых перемещениях. Было 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:

$$[K]_e \{U\}_e = \{F\}_e + \{P\}_e^g + \{P\}_e^q + \{P\}_e^{\varepsilon_0} + \{P\}_e^{\sigma_0}, \quad (3.1)$$

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 [130]. Более эффективными и во многих случаях более корректными способами обоснования уравнений жёсткости элементов являются вариационные методы и методы невязок [131].

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 μ , $[m]_e$ - матрица массы элемента, зависящая от плотности материала элемента ρ .

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; $\{Q\}_e^q, \{Q\}_e^g, \{Q\}_e^h$ - 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 так называемой 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 среда междисциплинарного конечно-элементного анализа ANSYS Multiphysics [118]. Выбор данной программной среды обусловлен возможностью использовать при выполнении сопряженного анализа тепловой и прочностной задачи единственную конечно-элементную модель, с соответствующим набором параметров.

Глава 4. Расчетно-аналитический метод определения контактного термического сопротивления.

4.1. Прочностной расчет.

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 смещения образцов, формирование площади контакта и КТС.

Поскольку суть методики конечных элементов заключается в описании любого объема простыми геометрическими фигурами, в данном случае тетраэдрами, то от того насколько правильно подобран параметр описания криволинейных поверхностей данными элементами зависит конечный результат. Это объясняется тем, что криволинейные поверхности разбиваются на отдельные плоскости. В качестве параметра, отвечающего за описание кривизны поверхности, принят угол кривизны к нормали поверхности (Рис.4.1)

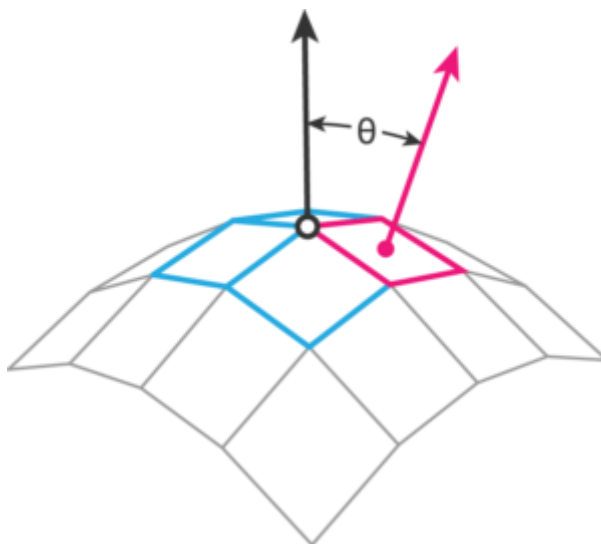


Рис.4.1. Угол кривизны к нормали поверхности.

Так же, влияющим фактором является базовая длина смоделированной поверхности на формирование площади контакта и КТС.

Начальные условия анализа (Рис. 4.2):

- 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*)

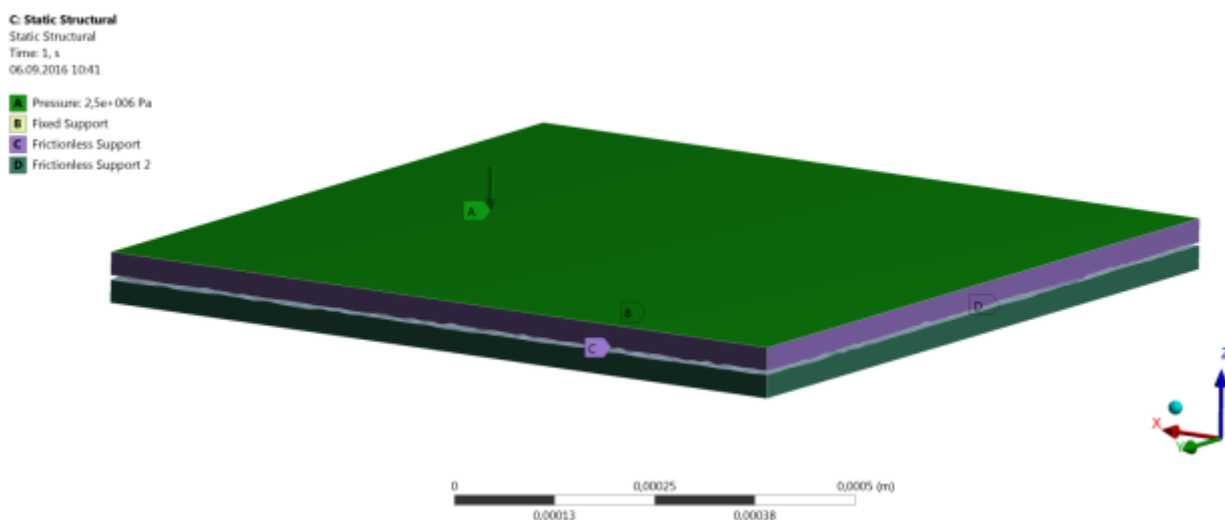


Рис. 4.2. – Задание граничных условий.

- 6) Контакт происходит с трением, $k=0,3$ [69]
- 7) Угол Θ , в качестве примера, варьируется в диапазоне от 20° до 50° с шагом 5°
- 8) Исследуются три образца с $L=1\text{ мм}$, 2 мм , 3 мм

Таким образом, для каждого из образцов получено по 7 расчетов КТС. Вид сеточной модели для каждого из углов Θ представлены на рисунках 4.3-4.9

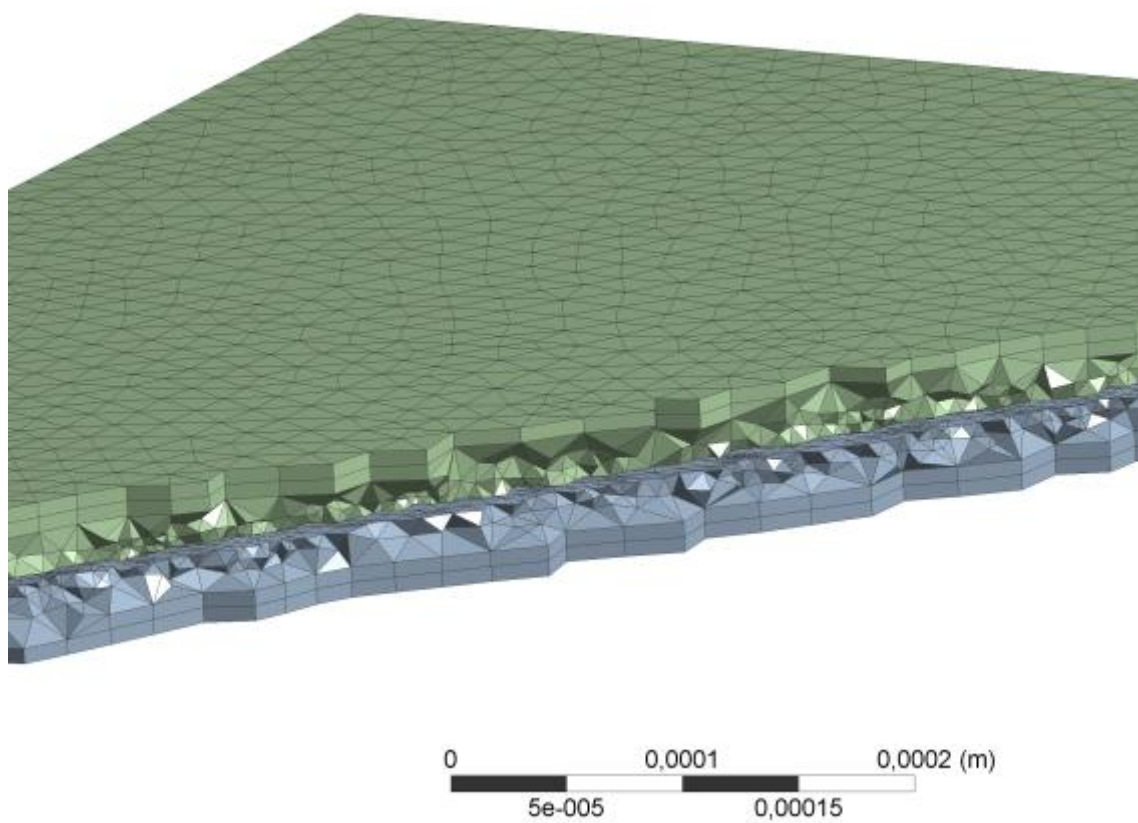


Рис.4.3.- Сеточная модель для $\Theta = 20^\circ$

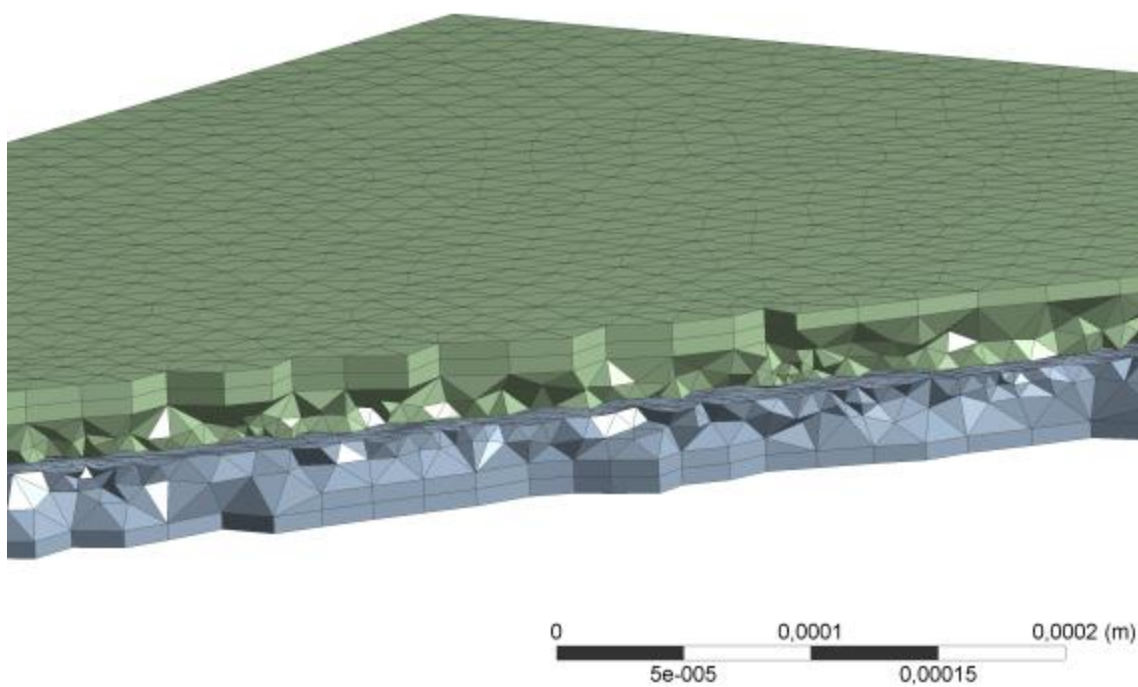


Рис. 4.4.- Сеточная модель для $\Theta = 25^\circ$

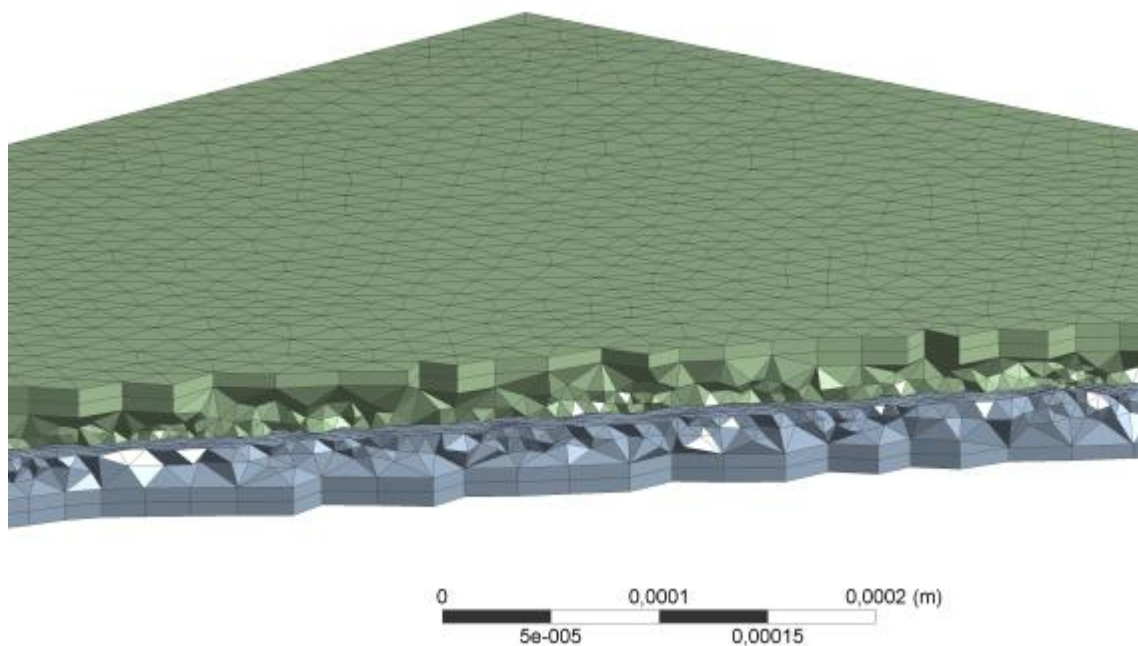


Рис. 4.5.- Сеточная модель для $\Theta = 30^\circ$

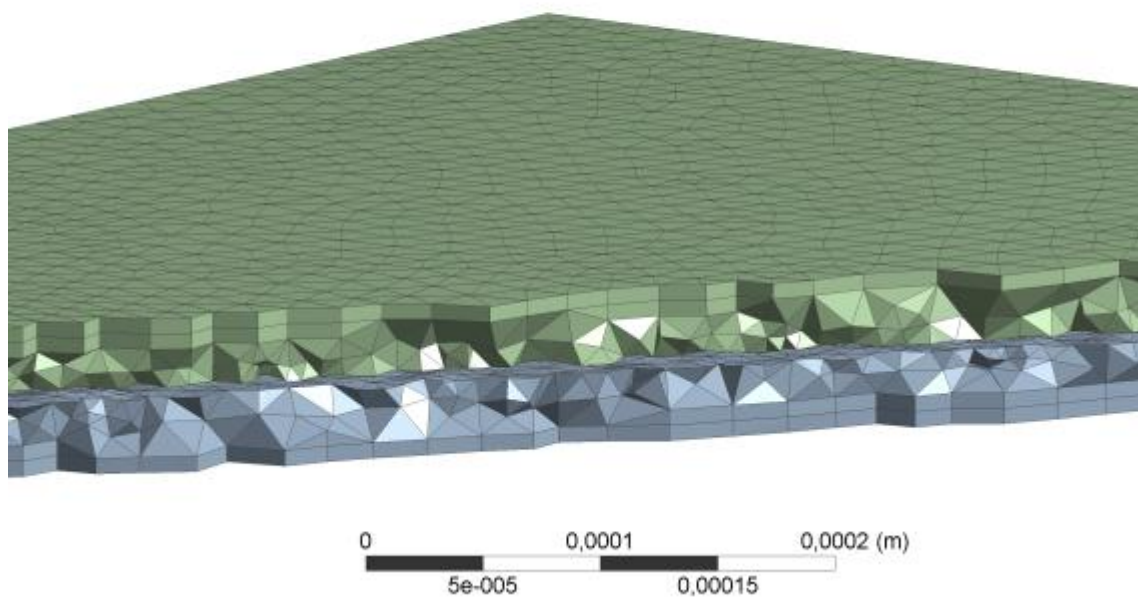


Рис. 4.6.- Сеточная модель для $\Theta = 35^\circ$

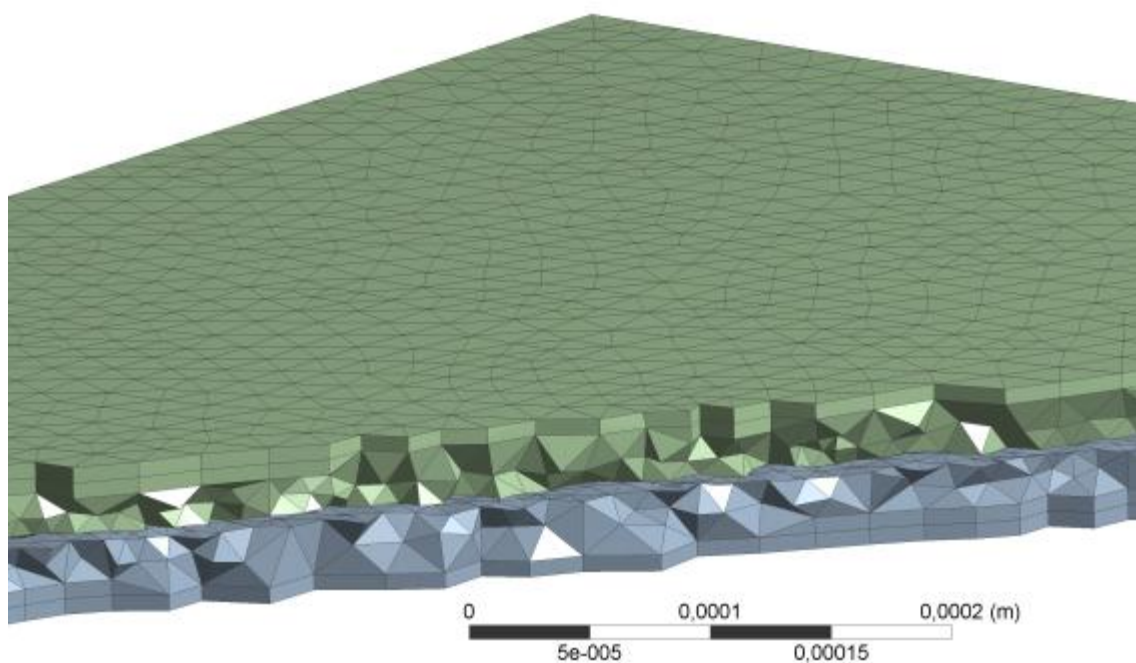


Рис. 4.7.- Сеточная модель для $\Theta = 40^\circ$

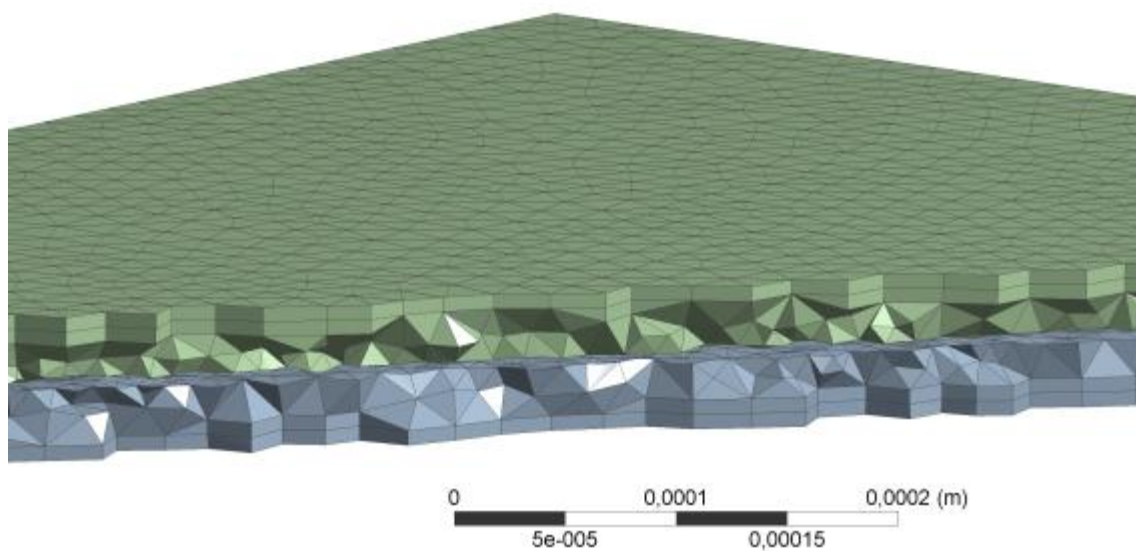


Рис. 4.8.- Сеточная модель для $\Theta = 45^\circ$

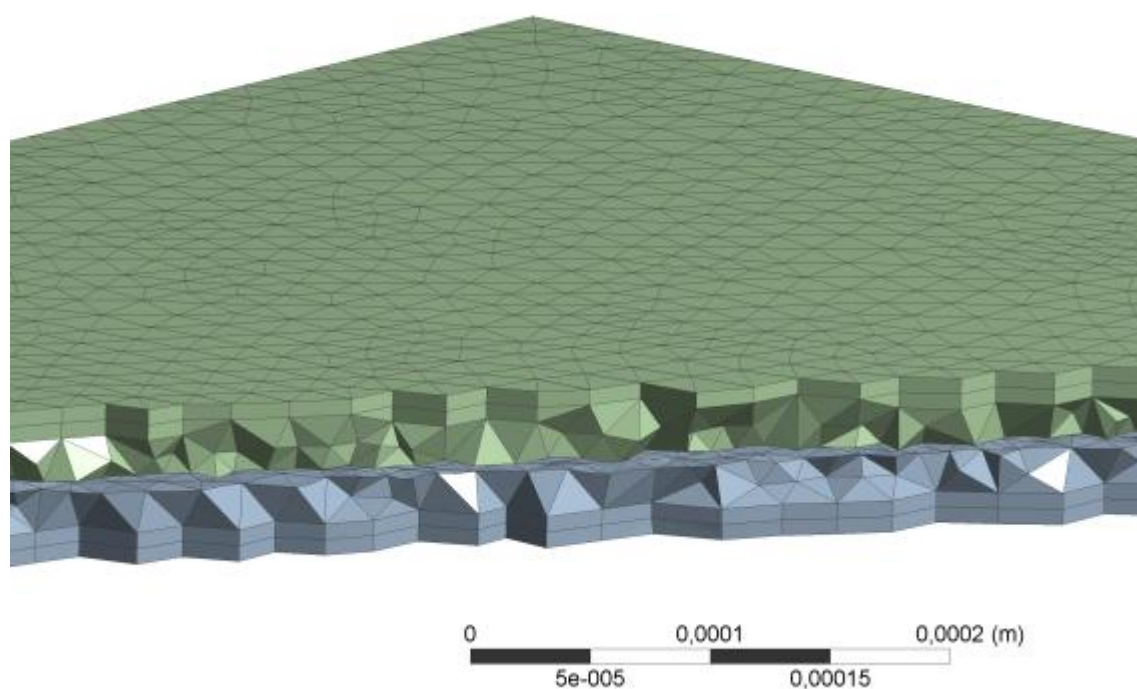


Рис. 4.9.- Сеточная модель для $\Theta = 50^\circ$

После передачи сеточной модели в подпрограмму прочностного анализа, к ней были приложены соответствующие граничные условия (Рис.4.2) По результатам прочностного анализа получены значения эквивалентных напряжений (Рис.4.10) и межконтактного давления, величина проникновения поверхности одной детали в поверхность другой детали (смещение).

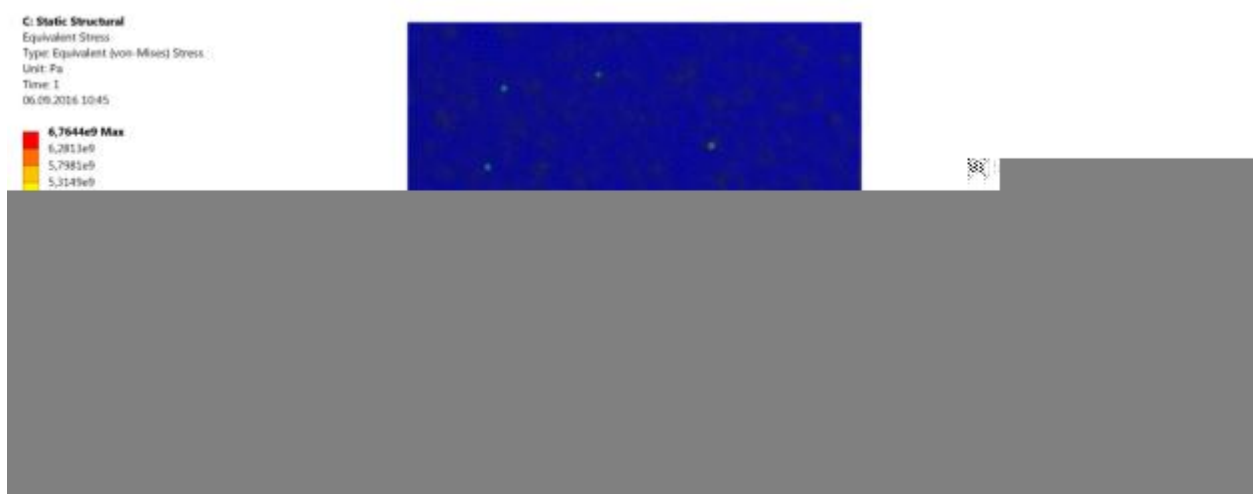


Рис. 4.10. – Поле эквивалентных напряжений на поверхности 12X18H10T для приложенного давления $2,5 \cdot 10^6$ Па.

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, с помощью операции верхний образец перемещается на заданное (Рис.4.11).

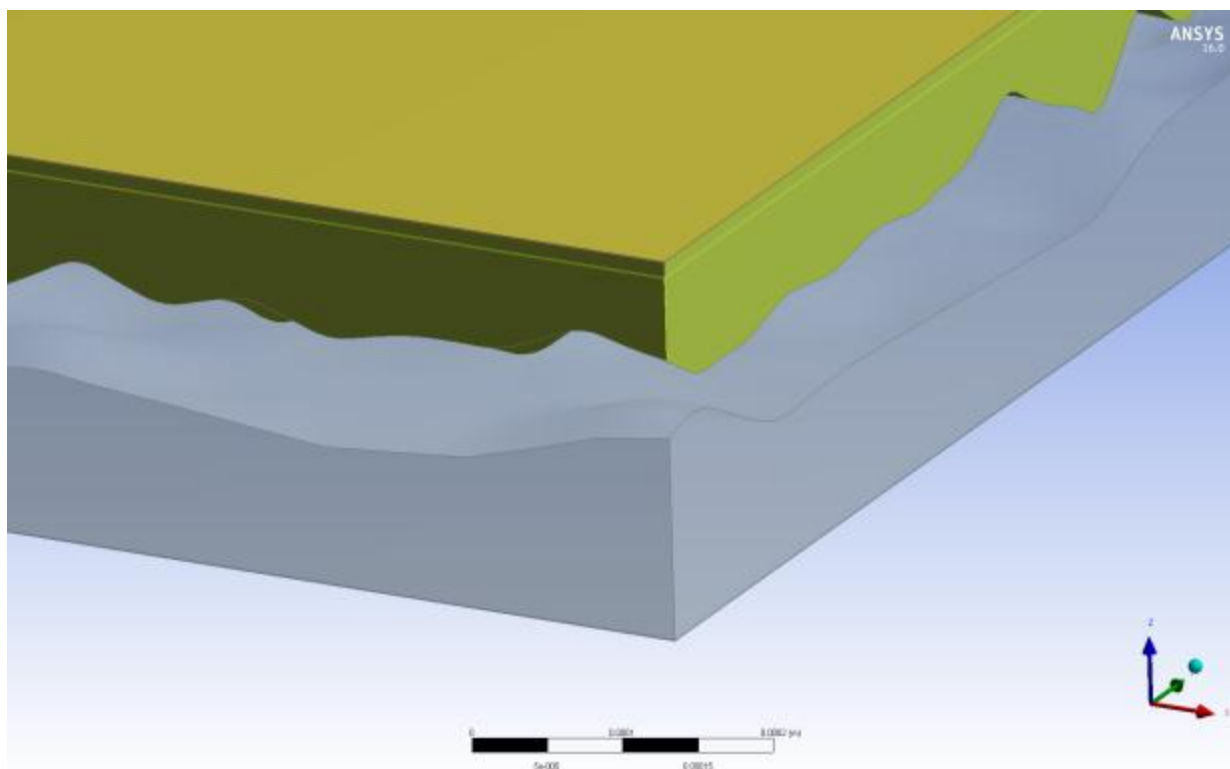


Рис. 4.11.– Перемещение поверхности на величину смещения.

После перемещения поверхности, получаем эффект проникновения одного твердого тела в другое твердое тело. Для того, чтобы в областях проникновения были образованы поверхности контакта необходимо удалить пересекающиеся объемы. В результате выполнения данной операции получается модель фактической площади контакта двух шероховатых поверхностей (Рис.4.12)

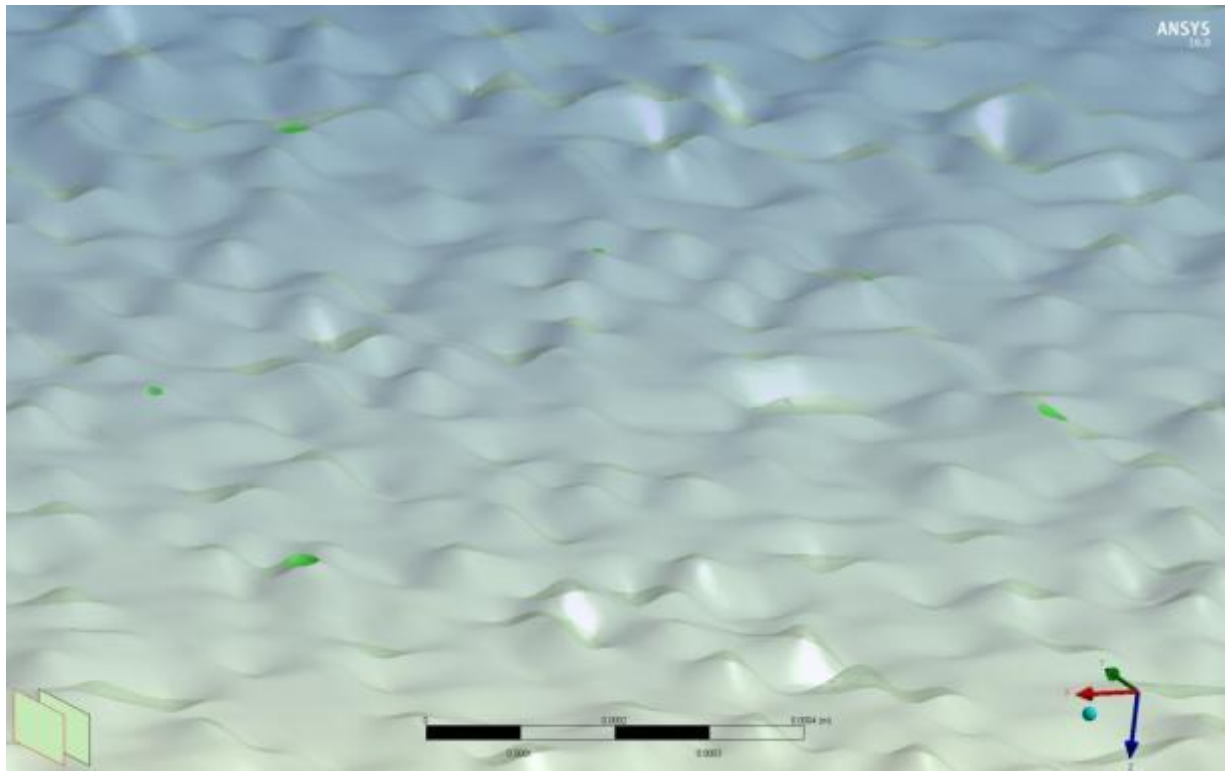


Рис. 4.12. – Фактическая площадь касания поверхностей (отмечена зеленым).

Для каждого угла Θ выполнялся подобный расчет. Результаты расчетов фактической площади контакта двух поверхностей, количество элементов и узлов сеточной модели сведены в таблицу 4.1.

Табл.4.1

Зависимость фактической площади контакта двух поверхностей, количество элементов и узлов сеточной модели от угла Θ .

а) $L=1\text{мм}$

Угол Θ град, °	Кол-во Узлов	Количество Элементов	Смещение м	Фактическая площадь м ²	% от всей площади %
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 Θ	Кол-во Узлов	Количество Элементов	Смещение	Фактическая площадь	% от всей площади
град, °			м	м ²	%
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 Θ	Кол-во Узлов	Количество Элементов	Смещение	Фактическая площадь	% от всей площади
град, °			м	м ²	%
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 4.1 уменьшение угла Θ 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 высоким требованиям к вычислительному оборудованию. Средний процент от всей площади контактирующих поверхности для образца с базовой длиной $L = 1\text{мм}$ равен 0,046, для $L = 2\text{ мм}$ – 0,051 для $L = 3\text{ мм}$ – 0,042.

4.2. Тепловой расчет

Знание фактических площадей касания позволяет максимально близко приблизиться к определению достоверного значения КТС. Таким образом, для определения распределения температурного поля, модели шероховатых

поверхностей с измененной геометрией от воздействия сжимающей нагрузки, были заданы в подпрограмме теплового анализа.

Располагая картиной формирования площади контакта, можно задаться температурой верхнего образца $T_{верх}$, и тепловым потоком, отводимым с 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 [7].:

$$R_K = (T_{ниж1} - T_{ниж2})/q,$$

где $T_{ниж1}$ и $T_{ниж2}$ – температуры холодных поверхностей идеального и реального контактов соответственно, полученные 2-х кратным 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 получается поле температур, направление и величина теплового потока в контактирующих образцах. На рисунках 4.13 – 4.15 представлено распределение температурного поля контактирующих поверхностей.

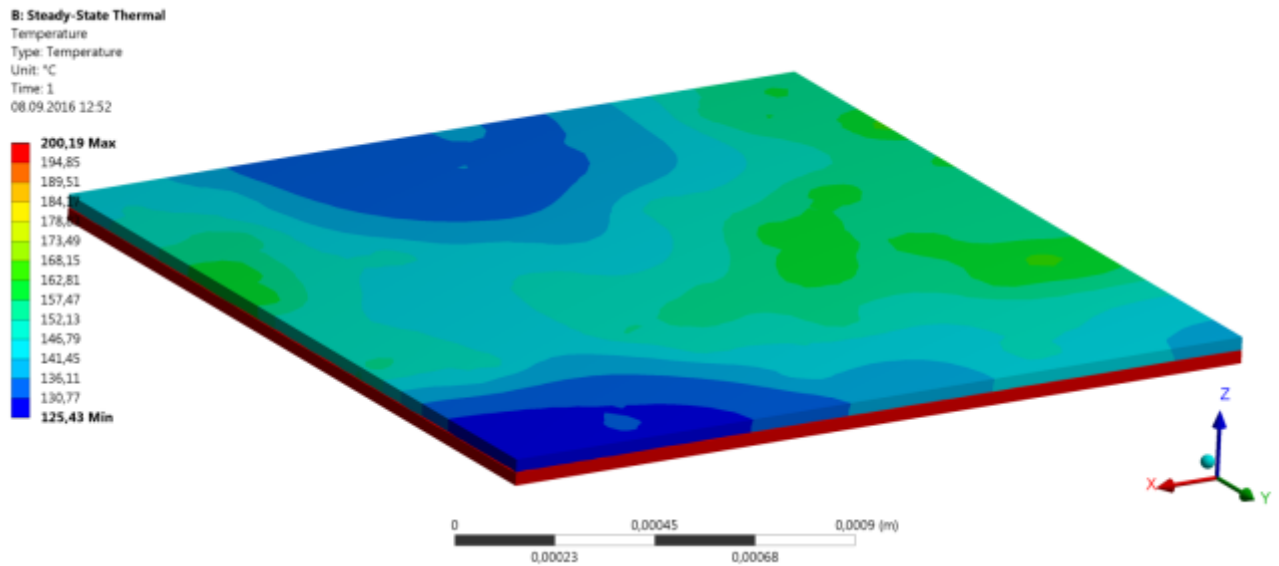


Рис. 4.13. – Распределение температурного поля в контактной паре 12X10H8T – 12X10H8T при межконтактном давлении $25 \cdot 10^5$ Па.

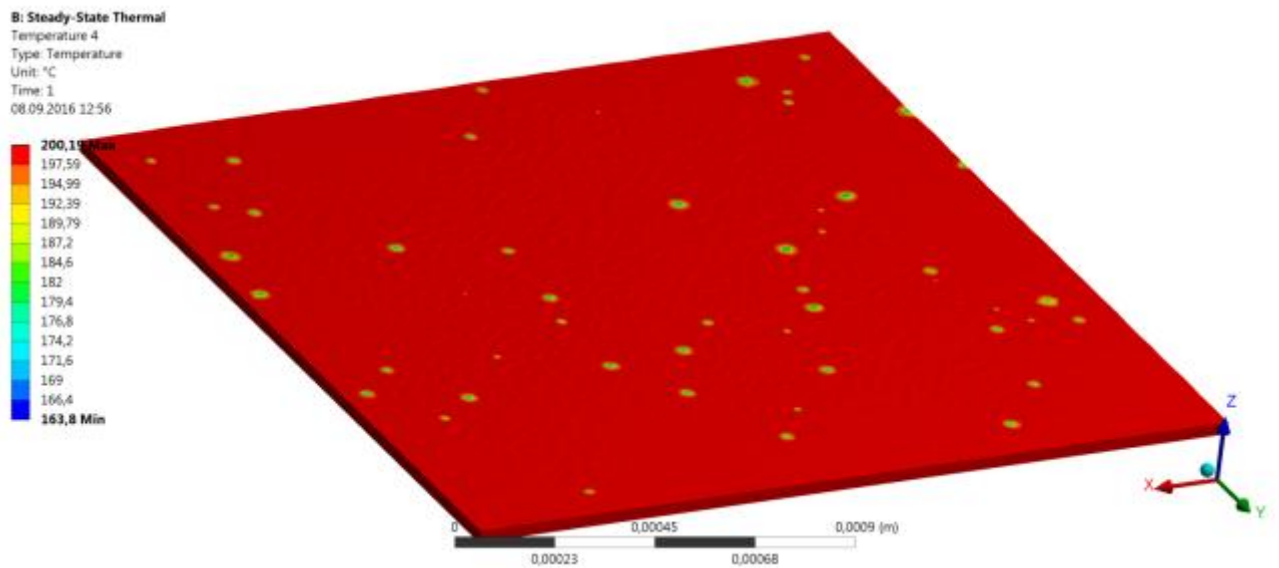


Рис. 4.14. – Распределение температурного поля на поверхности верхнего образца 12X10H8T при межконтактном давлении $25 \cdot 10^5$ Па..

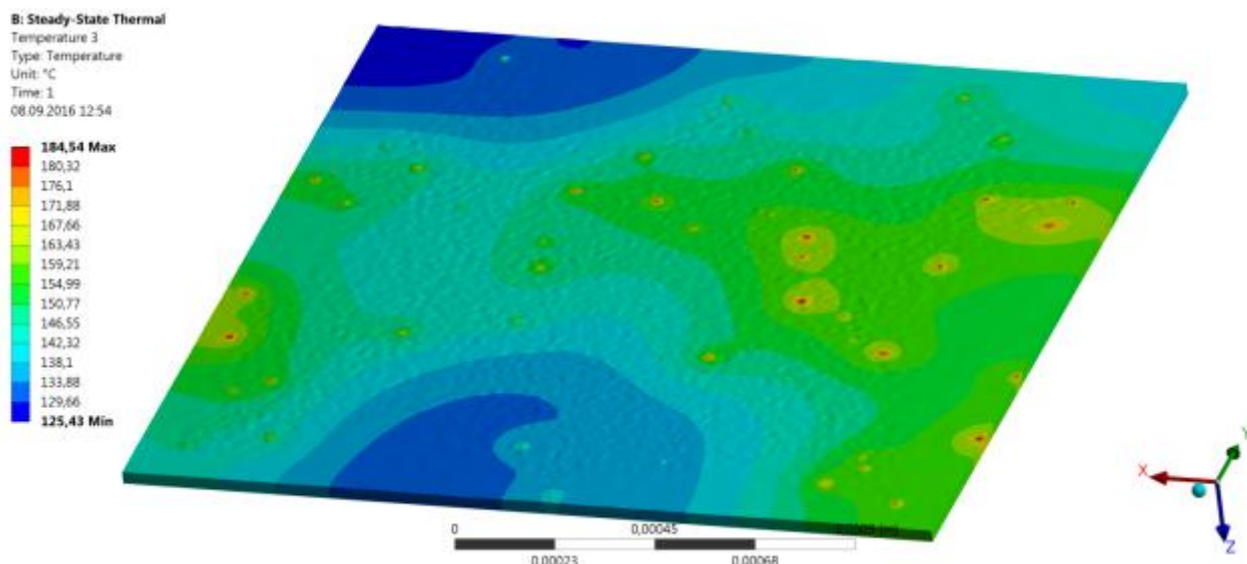


Рис. 4.15 – Распределение температурного поля на поверхности нижнего образца 12X10H8T при межконтактном давлении $25 \cdot 10^5$ Па..

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 Θ сведены в таблицу 4.2.

:

Табл.4.2.

Зависимость температуры в контакте от угла Θ

а) $L=1\text{мм}$

Угол Θ	$T_{\text{мин}}$	$T_{\text{макс}}$	$R_K \cdot 10^4$
град, °	°C		К·м ² /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 Θ	$T_{\text{мин}}$	$T_{\text{макс}}$	$R_K \cdot 10^4$
град, °	°C		$\text{К} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$
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 Θ	$T_{\text{мин}}$	$T_{\text{макс}}$	$R_K \cdot 10^4$
град, °	°C		$\text{К} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$
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 с аналитическими зависимостями были использованы следующие формулы авторов:

Мальков В.А.[4]:

$$\frac{1}{R_K} = 0,118 \frac{\bar{\lambda}_M}{40 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{P_K \cdot K}{3\sigma_B} \right)^{0,66} \quad (4.1)$$

Шлыков Ю.П.[5]

$$\frac{1}{R_K} = 8 \cdot 10^3 \cdot \bar{\lambda}_M \left(\frac{P_K \cdot K}{3\sigma_B} \right)^{0,86} \quad (4.2)$$

Попов В.М. [6]:

$$\frac{1}{R_K} = \frac{\bar{\lambda}_M}{30 \cdot 10^{-6}} A \left(\frac{P_K}{E} \beta T_k \kappa \right)^m \quad (4.3)$$

Меснянкин С.Ю. [7]

$$\frac{1}{R_K} = 1,15 \cdot 10^4 \lambda_{\text{мэкв}} \left(\frac{P_K^2}{3\sigma_B \cdot E} \frac{T_K}{T_{\text{пл}}} K^2 \right)^{0,302} \quad (4.4.)$$

В приведенных зависимостях:

$\bar{\lambda}_m$ – приведенная теплопроводность, определяемая через теплопроводность двух контактирующих материалов λ_{m1} и λ_{m2} по формуле:

$$\bar{\lambda}_m = (2\lambda_{m1}\lambda_{m2})/(\lambda_{m1} + \lambda_{m2});$$

$\lambda_{\text{мэкв}}$ – эквивалентная теплопроводность, учитывающая средние высоты микронеровностей соприкасающихся тел $h_{\text{ср1}}$ и $h_{\text{ср2}}$ и определяемая по формуле:

$$\lambda_{\text{мэкв}} = (h_{\text{ср1}} + h_{\text{ср2}})/(h_{\text{ср1}}/\lambda_{m1} + h_{\text{ср2}}/\lambda_{m2});$$

Результаты расчетов по аналитическим зависимостям при межконтактном давлении 2,5·МПа представлены в таблице 4.3.

Табл.4.3

Величина КТС

Автор	$R_K \cdot 10^4$, $\text{К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$
Мальков В.А. [4]	7,63
Шлыков Ю.П. [5]	8,49
Меснянкин С.Ю. [7]	9,10
Попов В.М. [6]	110,0
Данная работа	9,38

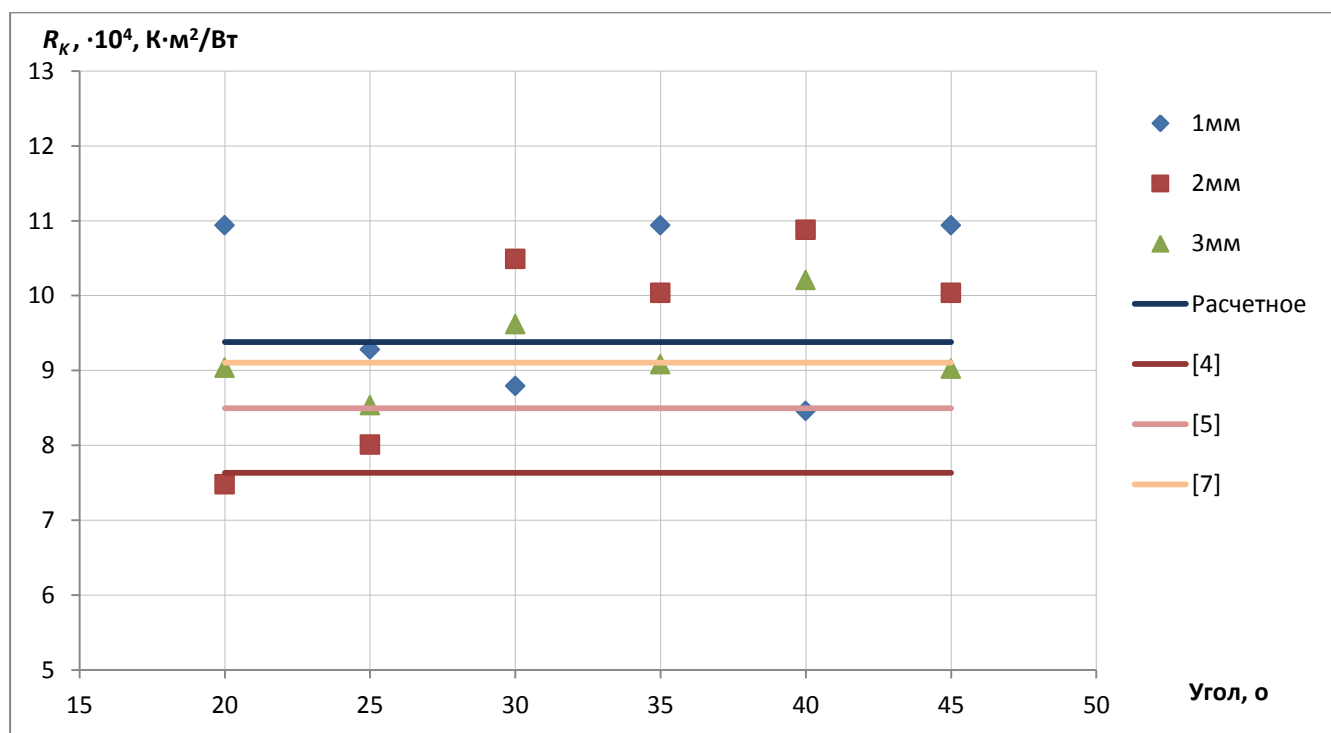


Рис. 4.16. – КТС пары 12X10H8Т - 12X10H8Т в вакууме при $T_k=150^\circ\text{C}$, $P_k=2,5$ МПа.

Сравнение с известными расчетными формулами и выборка результатов расчетов позволяют сделать вывод, что наиболее достоверные результаты и меньший разброс данных происходит при выборе угла Θ в районе 25° - 30° , и базовой длине 3 мм.

4.3. Контактное термическое сопротивление при наличии среды в зоне контакта.

В местах фактического контакта теплота передается теплопроводностью через фактическую площадь контакта. При наличии среды в межконтактной области расчет контактного термического сопротивления обычно производится по формуле [6] :

$$\frac{1}{R_K} = \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_C} \quad (4.1.)$$

где R_M - КТС через места фактического контакта,

R_C - термическое сопротивление среды.

Термическое сопротивление среды в наиболее простой форме определяется по формуле:

$$R_C = \frac{h_{cp1} + h_{cp2}}{2 \lambda_C} \quad (4.2.)$$

где h_{cp1}, h_{cp2} - средние высоты микровыступов,

λ_C - теплопроводность среды.

В предлагаемой методике, межконтактная область задается как пространство, заключенное между контактирующими поверхностями. Для него также создается сеточная модель, и в параметрах материала задаются свойства воздуха (Рис. 4.17).

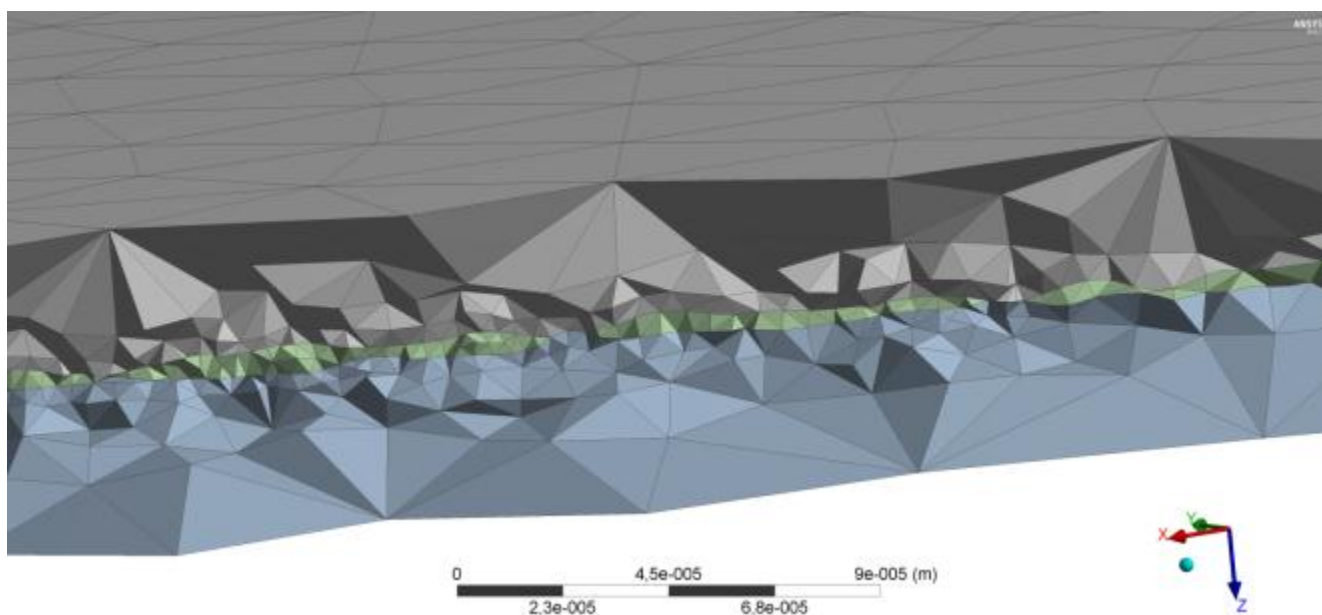


Рис.4.17 – Сеточная модель контакта с наличием среды в межконтактной зоне

Методик трехмерного моделирования микротопографии поверхности так же позволяет определить межконтактный объем, что в свою очередь в ряде задач инженерной практики играет существенное значение. На рисунке 4.18 представлено распределение температурного поля по межконтактной среде.

Значения КТС при наличии заполнителя, а также объем межконтактной среды в зависимости от угла Θ представлен в таблице 4.4.

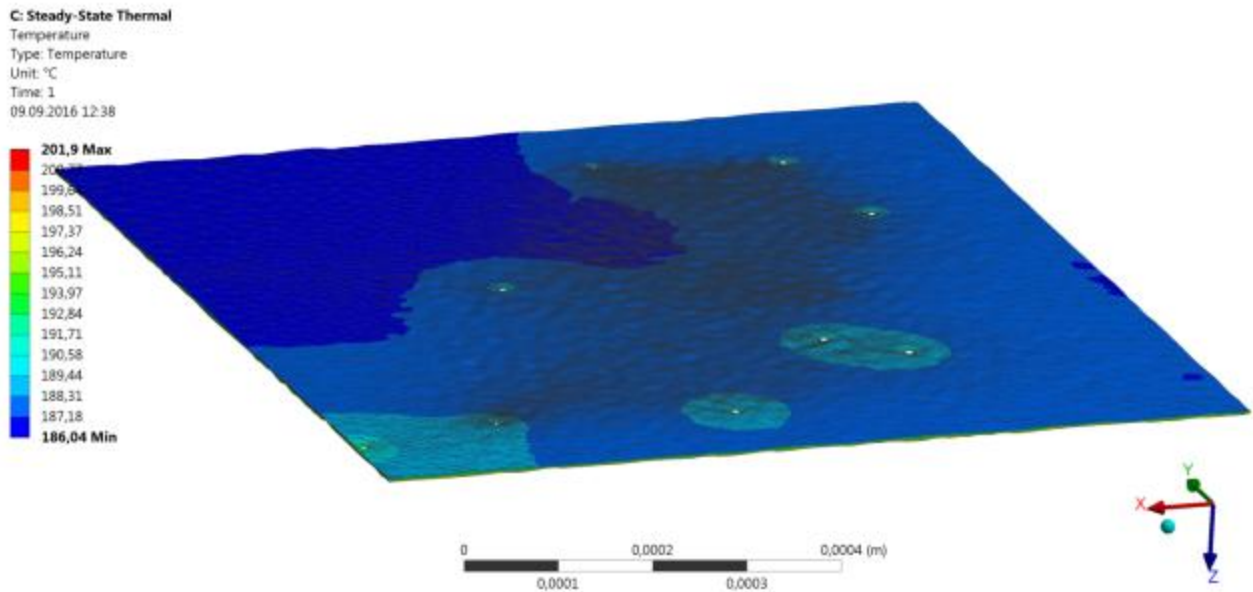


Рис.4.18 – Межконтактный объем и распределение температурного поля в нем

Табл.4.4

Зависимость КТС от угла Θ при наличии среды в зоне контакта

а) $L=1\text{мм}$

Угол Θ	$R_K \cdot 10^4,$
град, °	$\text{К} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$
20	1,36
25	1,36
30	1,35
35	1,36
40	1,33
45	1,36

a) $L=2\text{мм}$

Угол Θ	$R_K \cdot 10^4$
град, °	$\text{К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$
20	1.30
25	1.32
30	1.37
35	1.36
40	1.38
45	1.36

a) $L=3\text{мм}$

Угол Θ	$R_K \cdot 10^4$
град, °	$\text{К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$
20	1.34
25	1.33
30	1.36
35	1.34
40	1.37
45	1.34

Величина КТС при наличии воздуха в межконтактной области, рассчитанная по известным аналитическим зависимостям, с учетом формул [4.1-4.4] представлено в таблице 4.5 и рисунке 4.19:

Таблица 4.5

Величина КТС при наличии воздушной прослойки.

Автор	$R_K \cdot 10^4, \text{К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$
Мальков В.А. [4]	1,047
Шлыков Ю.П. [5]	1,062
Попов В.М. [6]	1,199
Меснянкин С.Ю. [7]	1,071

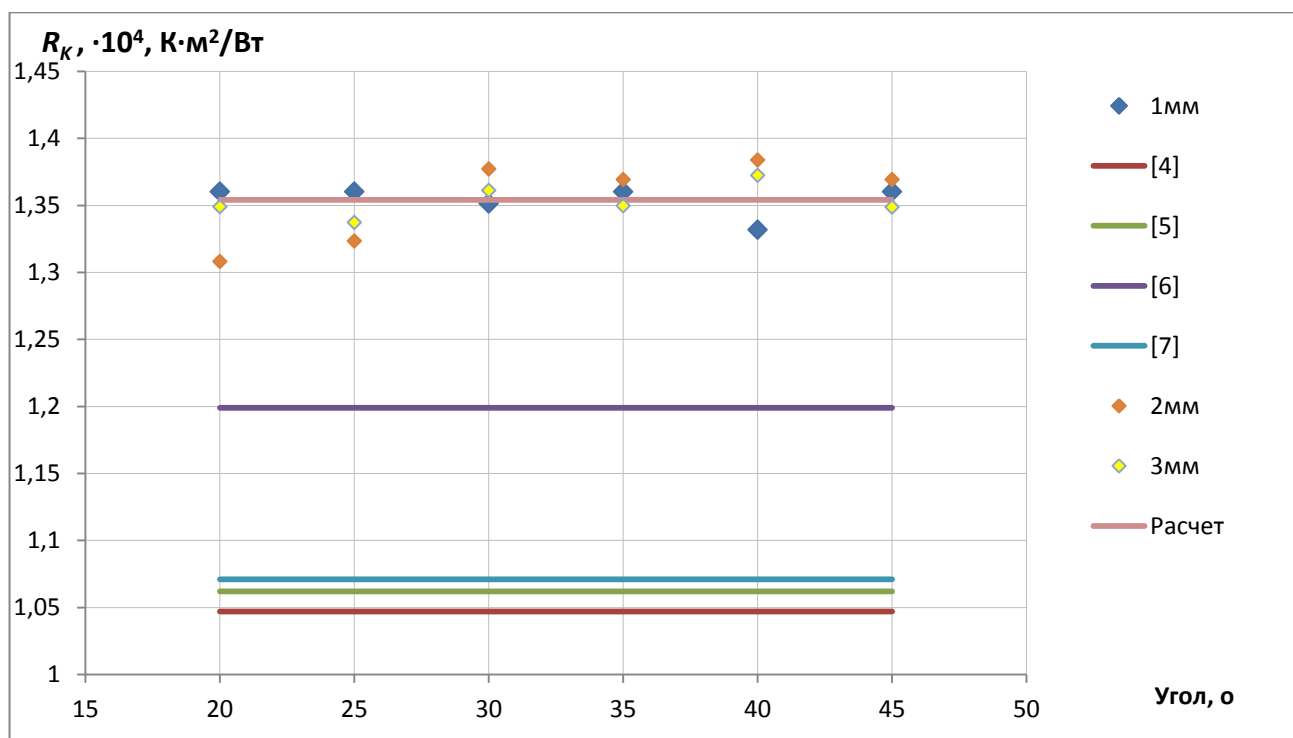


Рис.4.19. – КТС пары 12X10H8Т - 12X10H8Т с воздушной прослойкой

Различие в значениях КТС при наличии воздушной среды внутри контакта объясняется тем, что в формуле (4.2) используется средняя высота микровыступов, которая значительно ниже реальной рассматриваемой величины. Вследствие чего объем межконтактного пространства так же становится меньше, что приводит к уменьшению КТС всего контакта.

Проведя анализ по влиянию различных составляющих величину КТС с применением МКЭ, а так же сравнение с известными зависимостями можно сделать вывод, что предлагаемые формулы (4.1-4.7) можно использовать только для условий контактирования, для которых они были получены. В противном случае это приведет к сильно различающимся значениям температур в зоне контакта и, как следствие, самого значения КТС. Помимо всего, предлагаемая методика позволяет максимально точно перевести параметры шероховатой поверхности в трехмерный вид, пригодный для расчета, что в свою очередь ведет к уточненному определению контактных пятен и фактических площадей и межконтактного объема и позволяет проводить анализа КТС с любым наполнителем в пределах одной расчётной модели.

Глава 5. Экспериментальное исследование тепловых процессов в контактной зоне

5.1. Анализ известных конструкций экспериментальных установок.

Все теоретические положения нуждаются в экспериментальной проверке. Поскольку основным моментом в тепловых процессах контактных соединений является КТС [4,8,9,48], то необходимо провести натурные эксперименты по определению КТС для различных материалов.

Для этого нужна установка, отвечающая ряду требований:

1. Режимы нагрузки и нагрева должны соответствовать реальным процессам, протекающим в реальных конструкциях;
2. Обеспечение автоматизации проведения эксперимента и сбора экспериментальных данных;
3. Работа на установке должна отвечать необходимым требованиям по технике безопасности.

Создание надёжной конструкции экспериментальной установки возможно на основе критического анализа известных конструкций и современного уровня развития техники. Ориентируясь на данные требования, проанализируем известные конструкции экспериментальных установок.

В различных источниках для определения контактного термического сопротивления предложено несколько основных конструкций экспериментальных установок [4,6]. Все остальные - так или иначе являются их усовершенствованными вариантами.

Главная часть любой установки по исследованию КТС- рабочий участок, состоящий из образцов, нагревателя и холодильника. Чаще всего применяются цилиндрические образцы, располагающиеся соосно один над другим. В плоскости их соприкосновения реализуется наблюдаемое контактное термическое сопротивление. В зависимости от материалов, применяются две схемы измерения температуры в области контакта. Наиболее распространенная - путем заделки термопар по высоте и исследования распределения температурного поля по

высоте контактирующих образцов. В случае, когда исследуется контактное термическое сопротивление между разнородными металлами, используется эффект «естественной термопары».

Также возможно применение цилиндрических кольцеобразных образцов в коаксиальном трении. Но это увеличит габариты установки, также усложняется организация контакта, так как их нужно устанавливать точно друг над другом, чтобы площадь контакта не отличалась от расчетной. Поэтому наиболее актуальными остаются образцы цилиндрической формы.

Для обеспечения одномерности прохода теплового потока необходимо предусмотреть теплоизоляцию боковых поверхностей исследуемых образцов. Для этого в разработанной установке роль тепловой изоляции играет волокнистый наполнитель, распадаться ему не позволяют углепластиковая труба.

Нагреватель представлен в виде хомутовой зажим с нагревательным элементом и керамической изоляцией. Холодильник представляет замкнутую систему воздушно-водяного охлаждения.

Система нагружения бывает двух основных видов — рычажная и прессовая [4]. Выбор той или иной схемы зависит от предпочтений и возможностей разработчиков и конструкторов экспериментальной установки, а также от необходимой нагрузки, так как прессовая система позволяет создать большее усилие.

Проведенный анализ различных экспериментальных установок позволил определить основные элементы и особенности их применения. Основываясь на этом, была предложена экспериментальная установка, вобравшая в себя известные и наиболее эффективные решения.

5.2. Обоснование выбранной схемы и ее конструктивные особенности

Экспериментальная установка представляет собой стальную основу из конструкции гидравлического пресса Т61210В с рабочим давлением до 10 т с рабочим участком внутри (рис. 5.1.).

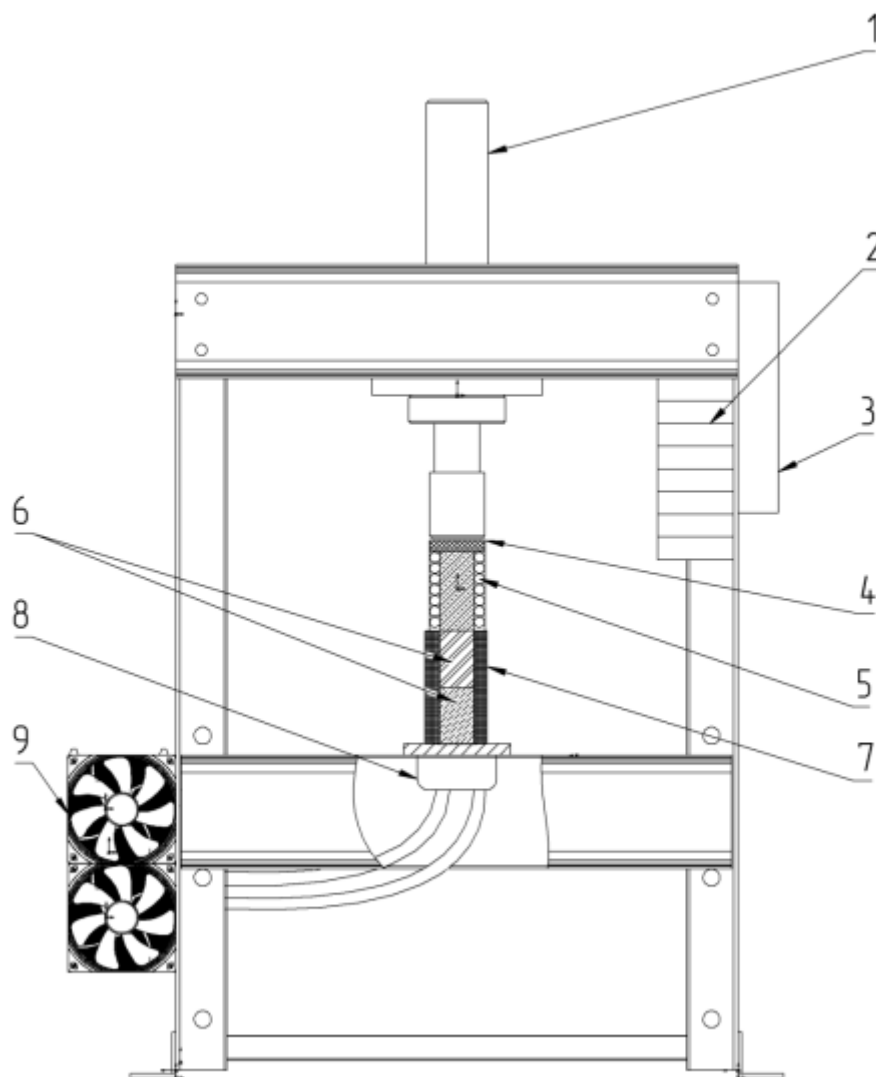


Рис.5.1. – Схема экспериментальной установки

Рабочий участок состоит из гидравлического штока 1, термодатчиков 2, системы сбора данных 3, текстолитовой прокладки 4, электронагревателя 5, образцов 6, компенсационных нагревателей 7, холодильника 8-9. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 5.2.

Экспериментальные образцы 2 цилиндрической формы изготавливаются из заданных материалов с известной степенью шероховатости контактирующих поверхностей.

Электронагреватель выполнен в виде кольцевого (хомутового) нагревателя (Рис.5.3) . Такие нагреватели предназначены для нагрева цилиндрических деталей оборудования технологического и бытового назначения: термопластавтоматов, экструдеров, оборудования для производства тары и упаковки, пресс-форм, литейных форм, фенов, трубопроводов.

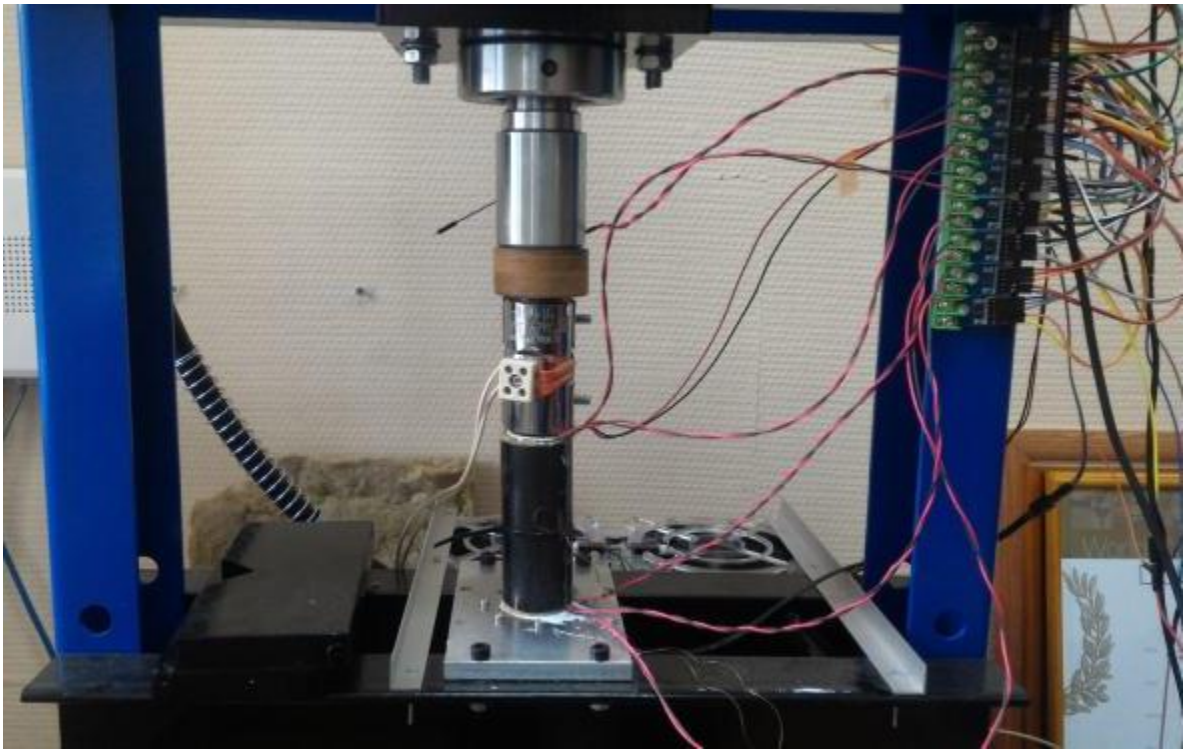


Рис.5.2. – Внешний вид экспериментальной установки перед экспериментом.

Принцип теплопередачи от нагревателя к телу следующий: от нагревательного элемента к обогреваемой детали тепло передается контактным способом.

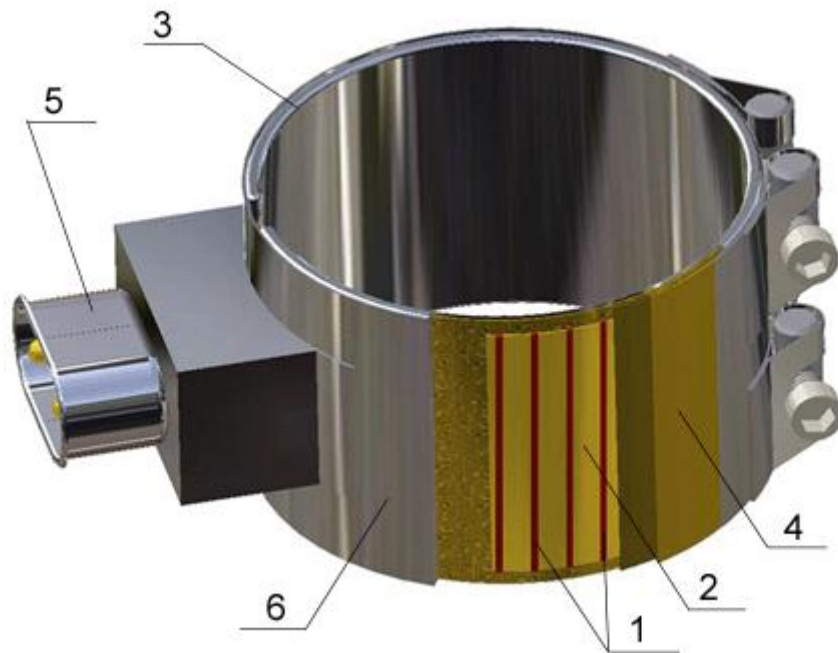


Рис.5.3. – Кольцевой нагреватель.

В нагревателях с изоляцией из керамики предварительно навитая спираль из резистивной проволоки (1) укладывается в каналы керамических изоляторов (2). Набор керамических изоляторов со спиралью внутри укладывается в хомут из нержавеющей стали (3). Для сокращения теплотерь между хомутом и керамикой прокладывается слой теплоизолятора (4). Затем нагревателю придается цилиндрическая форма и устанавливается контактный выход (5).

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 с помощью системы жидкостного охлаждения зарубежного производства и очень доступной по цене *Zalman Reserator 3 Max Dual* (Рис.5.4.).



Рис.5.4. - Система жидкостного охлаждения.

Нагрузка на образцы производится с помощью гидравлического пресса 1. Давление в системе контролируется при помощи цифрового датчика давления и манометра. Между нагревателем и штоком гидравлического пресса установлена текстолитовая прокладка для блокировки теплового потока в сторону штока.

Компенсационные нагреватели 6 служат для устранения утечек тепла с боковой поверхности образцов. Вывод проводов от термопар и датчиков реализуется через специальный электрический вывод.

5.3. Система измерения

5.3.1. Датчик силы сжатия

В экспериментальной установке применяется датчик (преобразователь) давления измерительный БД ПД-Р (Рис.5.5.). Датчик давления БД модификации ПД-Р является современным решением для всех отраслей промышленности.

Датчик преобразует давление рабочей измеряемой среды в выходной электрический сигнал. Данный преобразователь позволяет измерить абсолютное или избыточное давление в статическом или динамическом режиме. Максимальное давление, на которое рассчитан датчик 600 бар. Корпус датчика изготовлен из высококачественной нержавеющей стали. Материал уплотнения - витон. В качестве мембраны используется кремниевый тензорезистивный чувствительный элемент.

Краткие технические данные:

Тип давления: избыточное, разрежение, абсолютное.

Диапазоны измерения: 600 бар

Основная погрешность: 0,25 %

Выходные сигналы: 4...20 мА;

Чувствительный элемент: кремниевый тензорезистивный.

Температура измеряемой среды: -40...150° С.

Измеряемые среды: воздух, пар, жидкости и другие среды, нейтральные к материалам датчика давления, имеющие контакт с измеряемой средой.

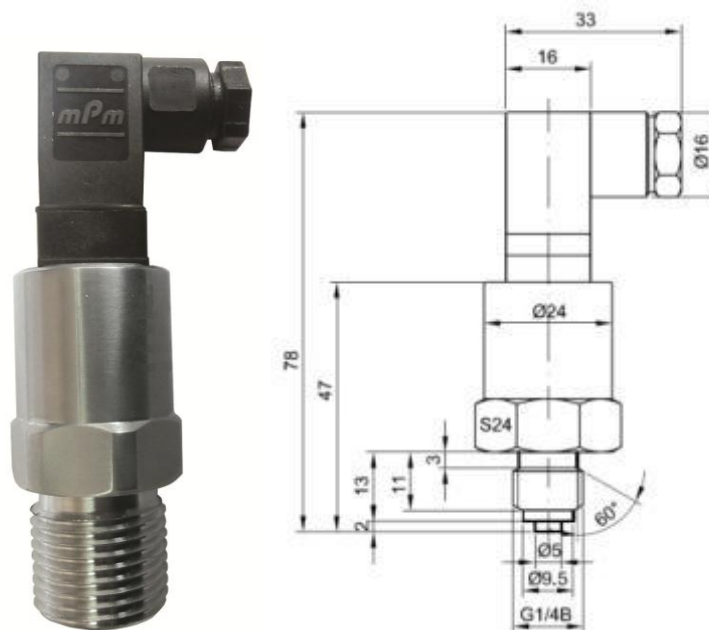


Рис.5.5. - Преобразователь давления измерительный БД ПД-Р

5.3.2. Измерение температуры

Измерение температуры производится посредством термопар. В данной работе применялись хромель-алюмелевые термопары, поскольку они обладают высоким классом точности и подходят по температурному диапазону, в котором проводятся измерения.

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. Сигнал с термопары поступает на преобразователь сигнала термопары К-типа *MAX6675*, который преобразовывает его в цифровой сигнал. (Рис.5.6.)



Рис.5.6. - Преобразователь сигнала термопары К-типа *MAX6675*

5.3.3. Станция сбора данных

Система измерения, реализованная в предлагаемой экспериментальной установке, состоит из набора датчиков, снимающих показания и станции сбора данных, подключенной к ПК. В качестве станции сбора данных выступает *Arduino Mega 2560* (Рис.5.7.).

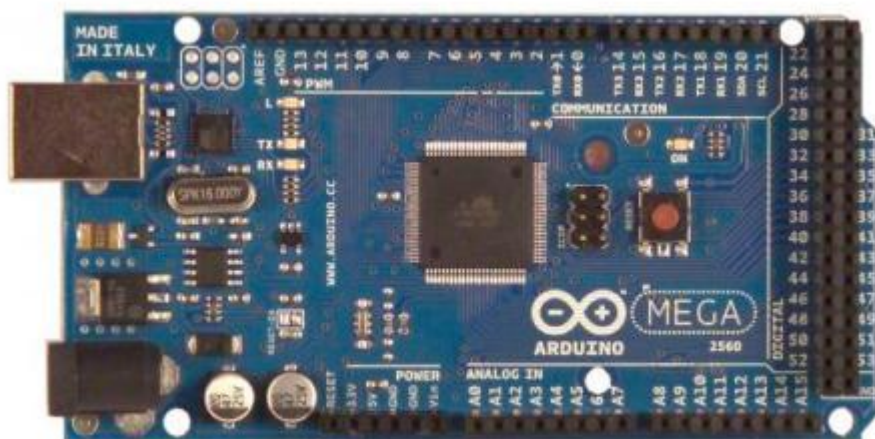


Рис.5.7. - Станция сбора данных Arduino Mega 2560

Arduino Mega построена на микроконтроллере *ATmega2560*. Плата имеет 54 цифровых входа/выходов (14 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта *UART*, кварцевый генератор 16 МГц, *USB* коннектор, разъем питания, разъем *ICSP* и кнопка перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля *USB* или подать питание при помощи адаптера *AC/DC*, или аккумуляторной батареей.

Краткие характеристики

Микроконтроллер	ATmega2560
Рабочее напряжение	5В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12В
Входное напряжение (предельное)	6-20В
Цифровые Входы/Выходы	54 (14 из которых могут работать также как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через вход/выход	40 мА

Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 mA
Флеш-память	256 KB (из которых 8 KB используются для загрузчика)
ОЗУ	8 KB
Энергонезависимая память	4 KB
Тактовая частота	16 MHz

Для сбора экспериментальных данных, таких как температура в каждой термопаре и давление на образцы, написана программа, которая в дальнейшем была зашита в микроконтроллер. Текст программы представлен в приложении.

5.4. Методика проведения эксперимента

Задача определения КТС в соединениях металлических поверхностей с композиционными материалами - 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, предлагается следующая последовательность действий:

- заделка термопар в заранее подготовленные экспериментальные образцы (Рис.5.8);

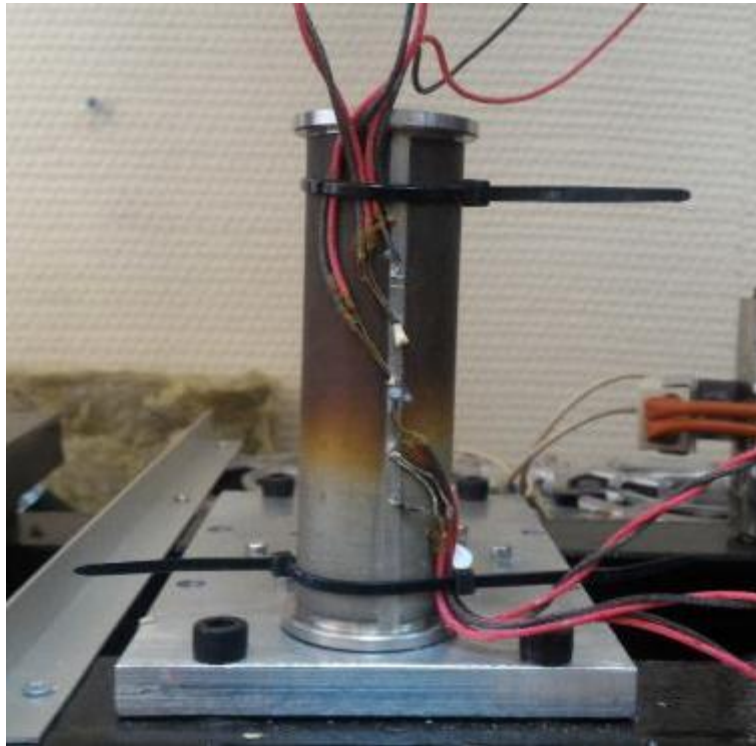


Рис.5.8. – Заделка термопар в заранее подготовленные экспериментальные образцы

- помещение образцов в теплоизоляцию;
- установка образцов на охлаждаемый стол;
- установка нагревателя;
- подсоединение проводов от термопар к преобразователям *MAX6675*;
- установка требуемого давления на гидравлическом прессе;
- запуск охлаждения;
- синхронно с включением нагревателя запуск записи выходных данных на компьютер в режиме реального времени;
- когда изменение температуры прекратилось, завершить эксперимент. Завершить запись данных на компьютер, отключить нагреватель;
- когда установка и образцы охладятся до комнатной температуры, отключить охлаждение.

5.5. Обработка результатов эксперимента

Обработка результатов эксперимента производилось с помощью методики, описанной в [6]. При проведении эксперимента записываются следующие параметры:

1. Давление в гидросистеме;
2. Показания термодатчиков.

Для определения контактного термического сопротивления при используется методика, ранее апробированная многочисленными экспериментами [6]:

$$R_k = \frac{b(R_B + R_H)}{a - b}$$

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 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:

$$\bar{\lambda}_B = \frac{2\lambda_{(T1)}^B \lambda_{(T4)}^B}{\lambda_{(T1)}^B + \lambda_{(T4)}^B}$$

Δ_1 – расстояние между 1-й точкой замера температуры и контактной плоскостью, м;

$\bar{\lambda}_H$ – приведенная теплопроводность нижнего образца:

$$\bar{\lambda}_H = \frac{2\lambda_{(T5)}^H \lambda_{(T8)}^H}{\lambda_{(T5)}^H + \lambda_{(T8)}^H}$$

Δ_2 – расстояние между плоскостью контакта и 8-й точкой замера температуры, м.

5.6. Оценка точности результатов эксперимента

Максимальная относительная погрешность эксперимента рассчитывается 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 – контактное термическое сопротивление;

Δt_k – температурный перепад в зоне контакта;

Δt – температурный перепад между соседними термопарами;

L – расстояние между соседними термопарами;

λ_M – теплопроводность контактирующих материалов;

σ – абсолютная погрешность при измерении данной величины.

Значения температур определялись с помощью хромель-алюминиевых термопар, термо-ЭДС. которых измерялись преобразователем термопар МАХ6675

погрешность измерений температуры лежит в пределах $\Delta t = \pm 0,25^\circ\text{C}$. Расстояние между термопарами измерялось микроскопом с точностью $\pm 0,05 \text{ мм}$. 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. $0,06^\circ\text{C}$.

Теплопроводность λ_M имеет погрешность в пределах 2%. Отсюда имеем:
 $\Delta t_k = (10 \pm 0,5)^\circ\text{C}$; $\Delta t = (10 \pm 0,5)^\circ\text{C}$; $L = (5 \pm 0,05) \text{ мм}$;

$$\frac{\sigma R_k}{R_k} \cdot 100 = \frac{0,5}{10} \cdot 100 + \frac{0,5}{10} \cdot 100 + \frac{0,05}{5} \cdot 100 + 1,5 = 12,5\%$$

5.7. Результаты эксперимента.

Для верификации предлагаемой методики были проведены натурные эксперименты на парах материалов Графит ($R_a = 1,96$) - 12X18H10T ($R_a = 0,13$). Внешний вид образцов представлен на рисунке 5.9.



Рис.5.9. – Экспериментальные образцы для определения КТС

Результаты экспериментов и графики зависимости КТС от приложенного давления приведены на рисунке 5.10.

Графит - 12X18H10T:

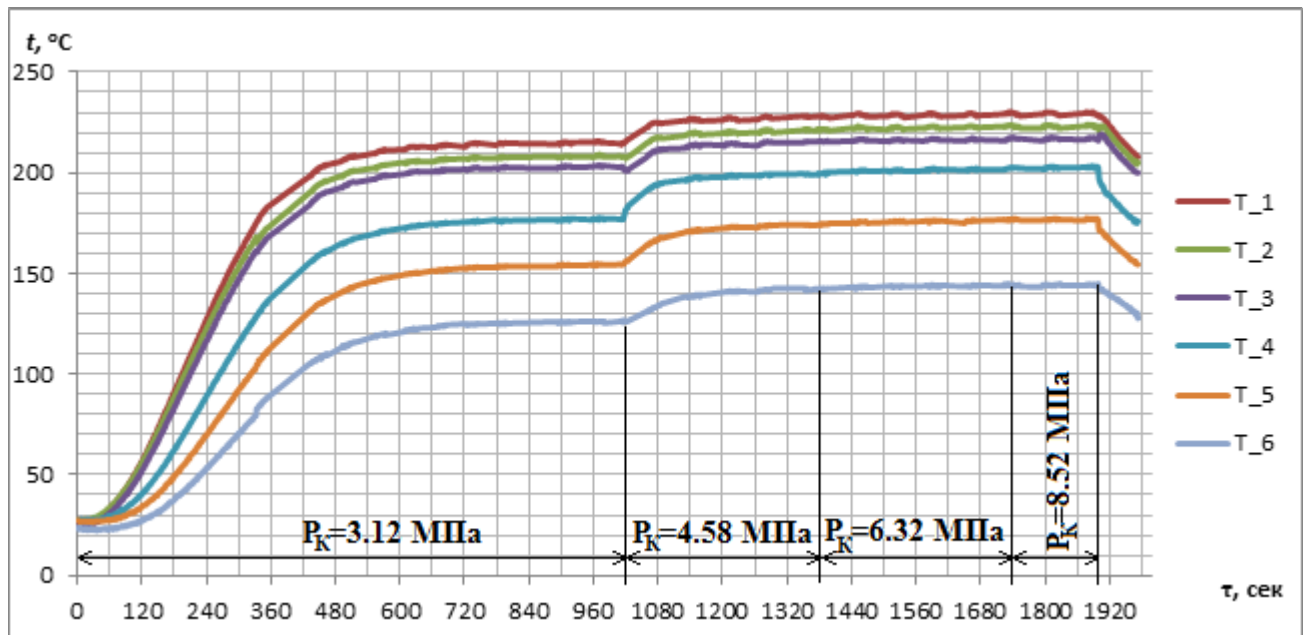


Рис.5.10. – График зависимости температур термопар от времени эксперимента для контактной пары Графит - 12X18H10T в воздухе

Таблица 5.1.

Величина КТС для соответствующих пар, рассчитанная по аналитическим зависимостям и предлагаемой методике представлена в таблице 5.1. и на рисунке 5.11.

Табл. 5.1.

Зависимость КТС пары Графит - 12X18H10T от приложенного давления.

P_k	Данные эксперимента	Расчетные данные	Меснянкин С.Ю. [7]	Шлыков Ю.П. [5]	Мальков В.А. [4]	Попов В.М. [6]
МПа	$R_K \cdot 10^4$ К·м ² /Вт					
3.12	1.81	2.15	0.44	0.81	0.90	2.10
4.58	1.67	1.65	0.34	0.64	0.77	1.48
6.32	1.49	1.38	0.31	0.53	0.67	1.34
8.52	1.17	1.15	0.27	0.43	0.59	1.21

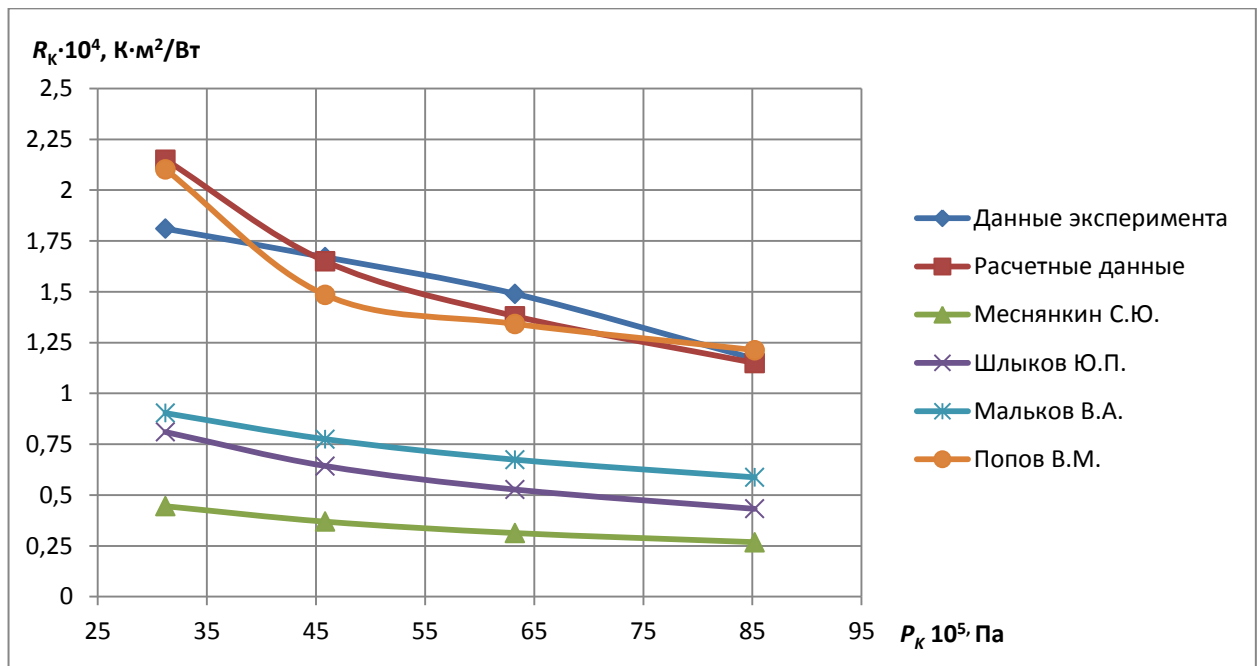


Рис.5.11 - Зависимость КТС пары Графит - 12X18H10T от приложенного давления

Из приведенных рисунков и ранее проведенных расчетов, видно что результаты расчетов наиболее достоверно описывают значение КТС для контактной пары Графит - 12X18H10T, в отличие от существующих аналитических зависимостей, что с определенной уверенностью позволяет рекомендовать приведенную методику для расчета КТС в широком диапазоне давлений.

Глава 6. Практическая реализация научных решений

6.1. Расчет тепловых процессов в конструкциях жидкостных ракетных двигателях малой тяги

6.1.1 Камера сгорания с возможностями изменения геометрии соединений

Исследуемым объектом является конструкция жидкостного ракетного двигателя малой тяги с камерой сгорания, изготовленной на основе композиционных материалов (КМК-МС). На рисунке 6.1 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.

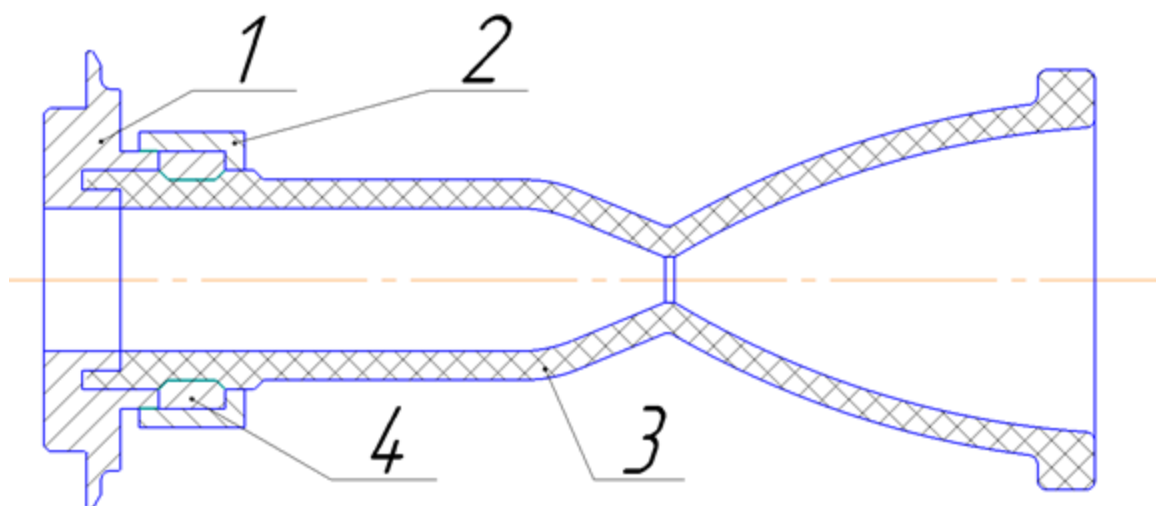


Рис. 6.1. – Конструкция в сборе. (1 - переходная головка, 2 - прижимное кольцо, 3 – камера сгорания из композиционного материала, 4 - переходное кольцо).

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.

6.1.2. 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° .

На рисунке 6.2 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.

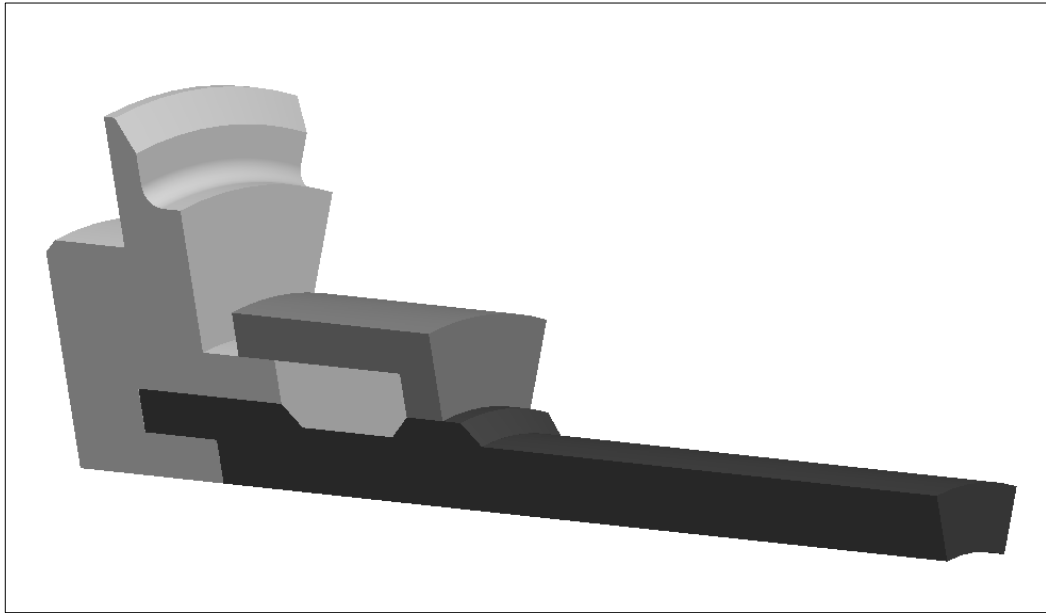


Рис. 6.2. – Объемная геометрическая модель.

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 рисунках 6.3 и 6.4. Для наглядности на рисунках отображено $\frac{3}{4}$ детали.

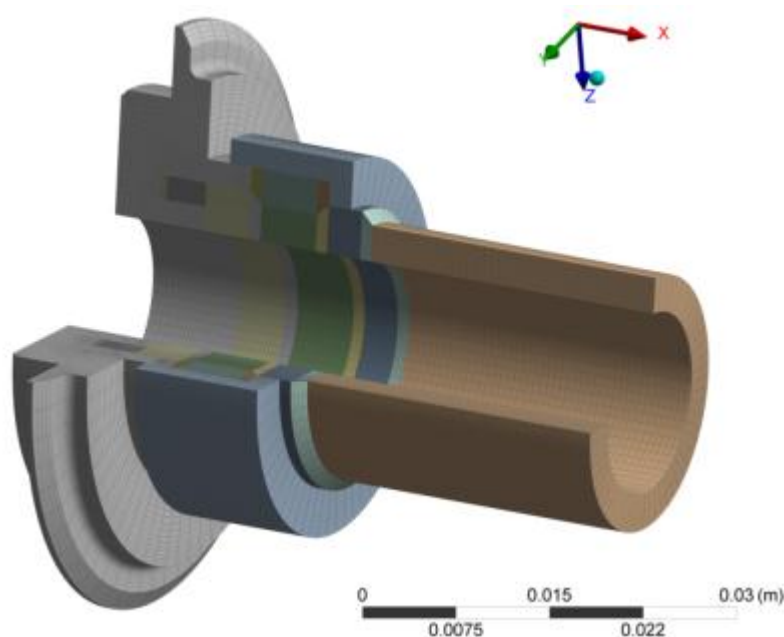


Рис.6.3 – Конечно-элементная модель для расчета.

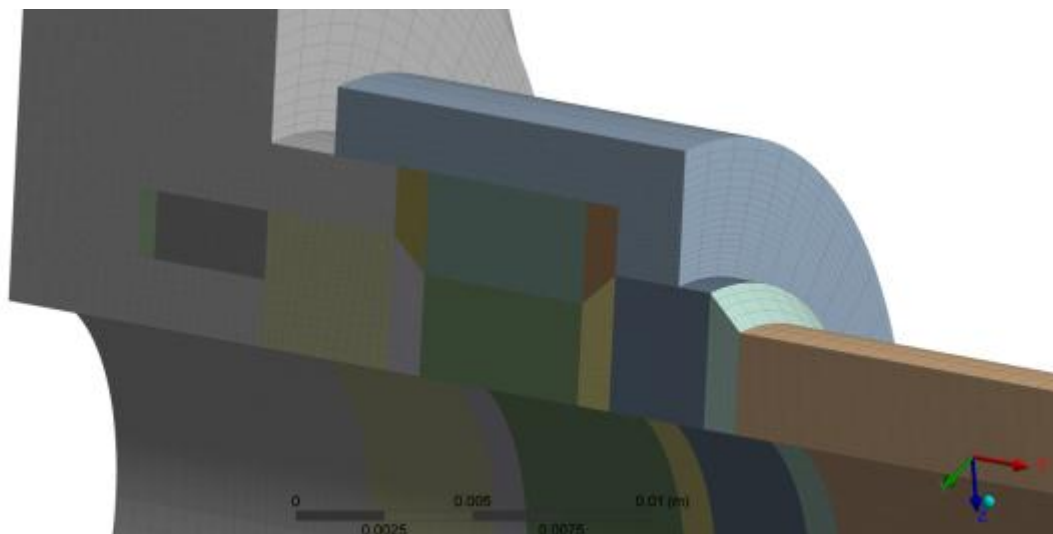


Рис.6.4 – Стыковочный узел, укрупненно.

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.

6.1.3 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 6.5.

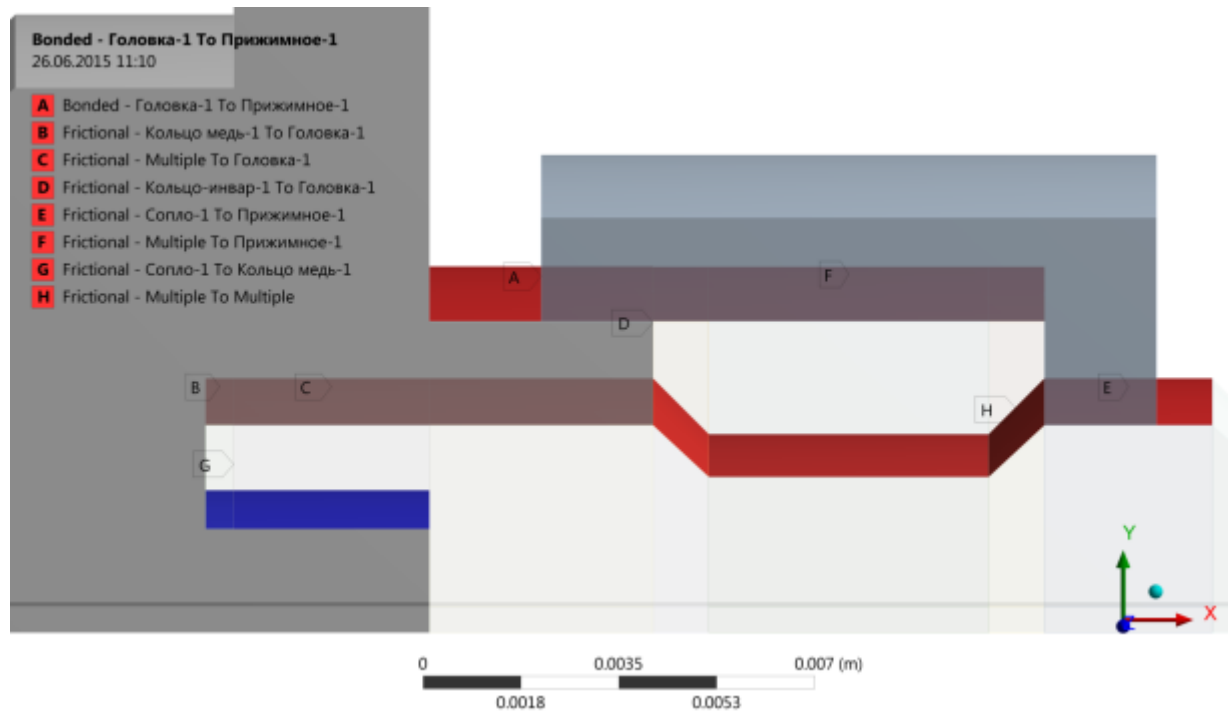


Рис. 6.5 – Установка типов контакта.

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 6.1.

Табл.6.1. Коэффициенты трения между материалами.

Пары материалов	Коэффициент трения, μ
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/м², *B*, *C* – излучение в окружающую среду с поверхности изделия. Степень черноты материалов принималась равной 0,8. (Рис.6.6)

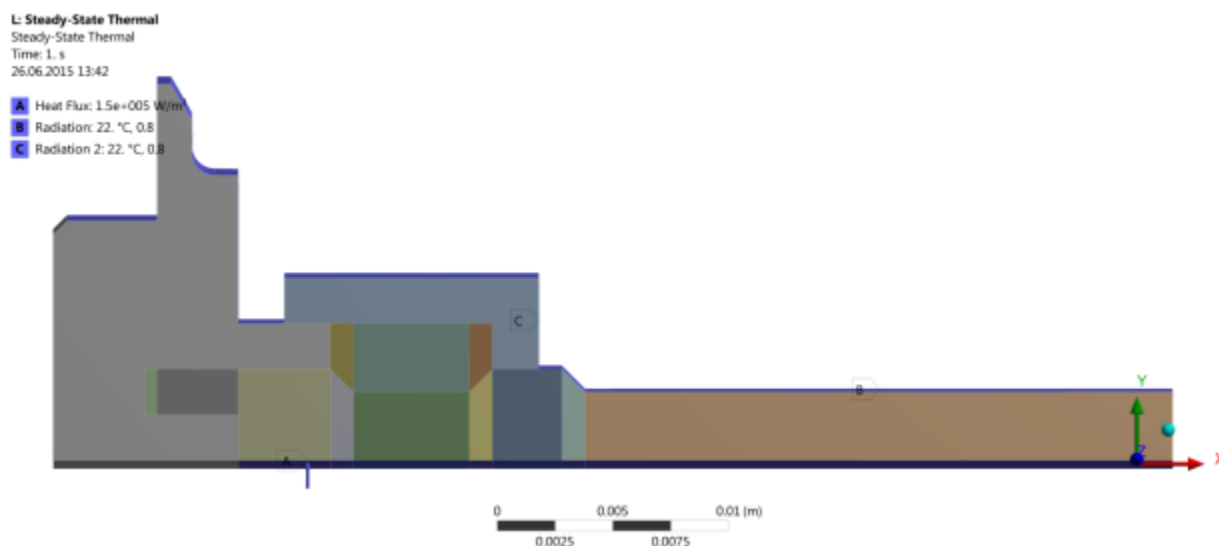


Рис.6.6 – Установка граничных условий.

6.1.4. 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.6.7-6.10).

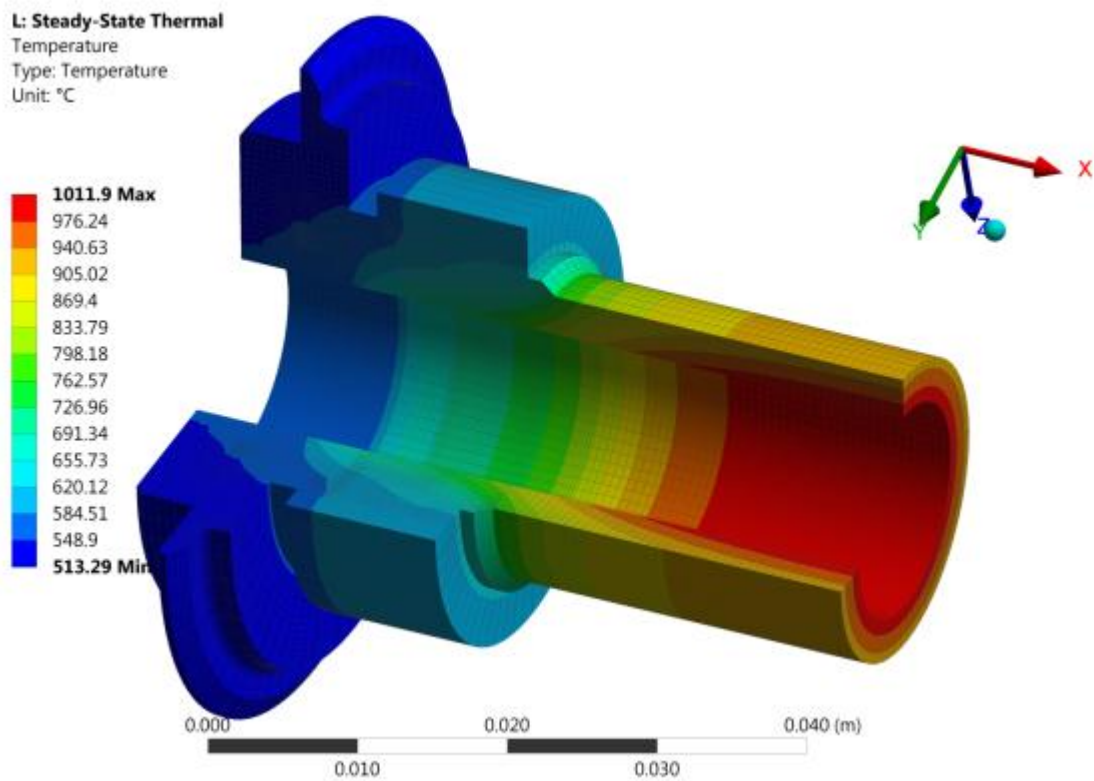


Рис.6.7 – Температурное поле конструкции.

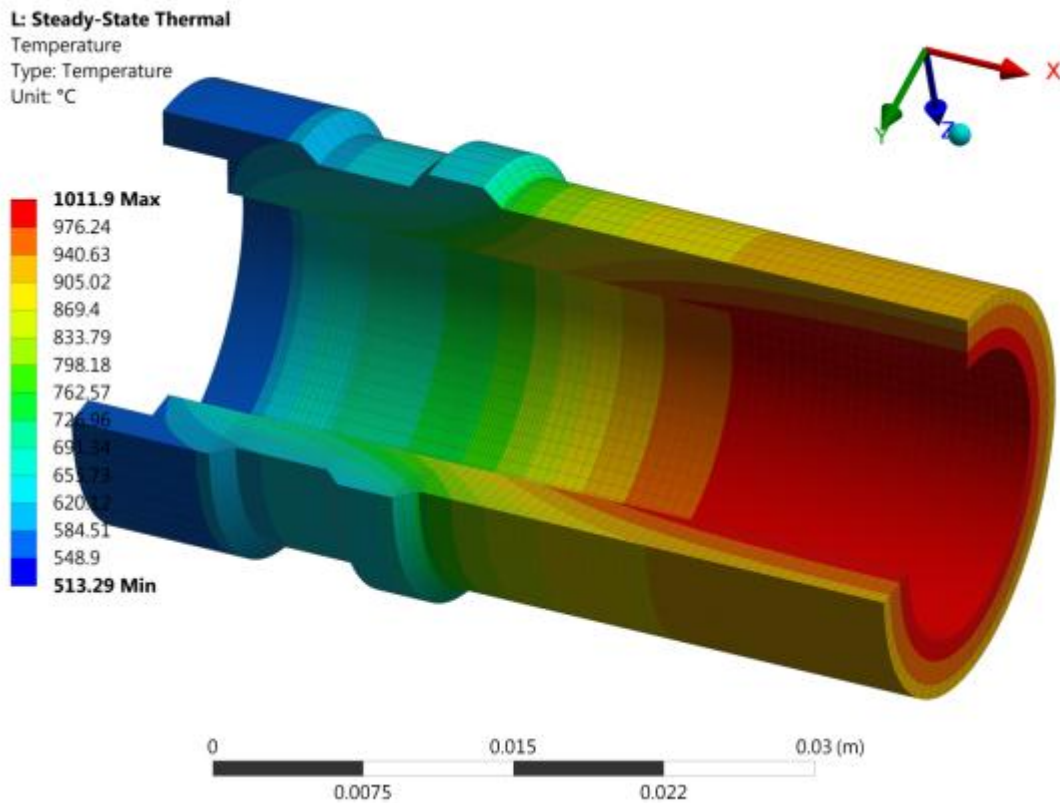


Рис.6.8 – Температурное поле композитной камеры сгорания.

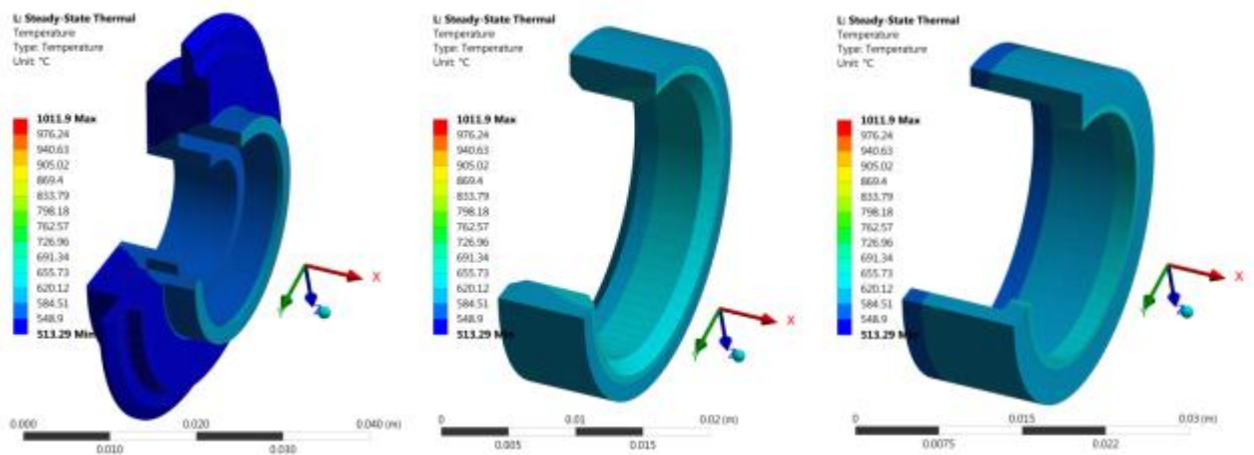


Рис.6.9 – Температурные поля переходной головки, переходного и прижимного колец.

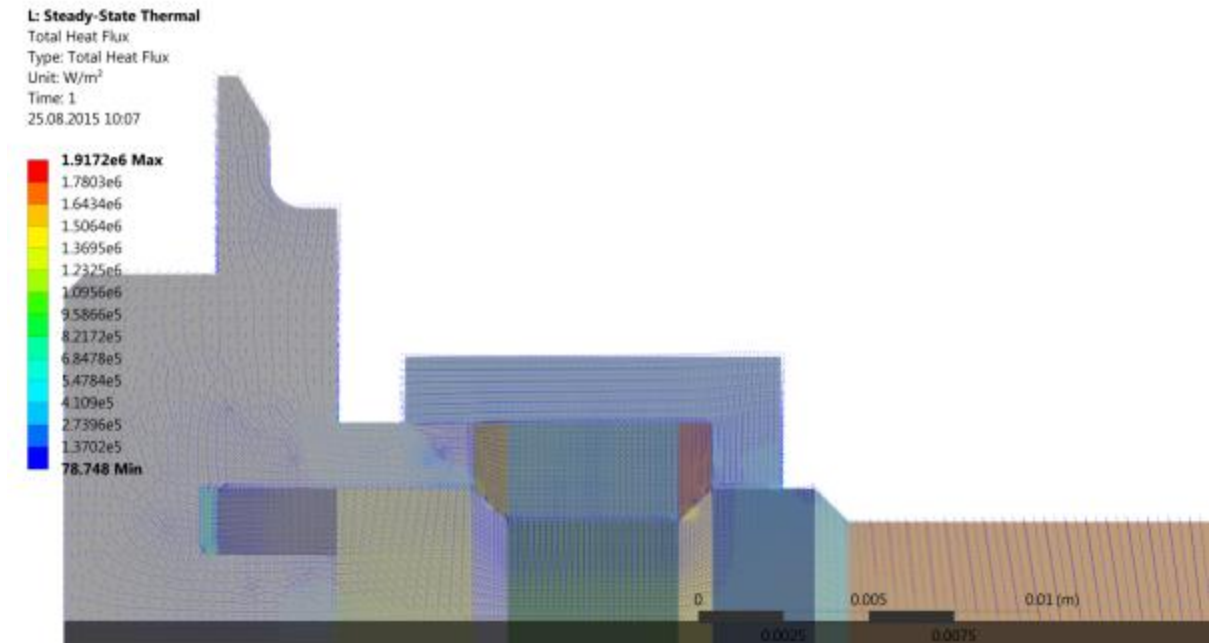


Рис.6.10 – Направление и величина теплового потока в элементах конструкции.

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.6.11-6.14).

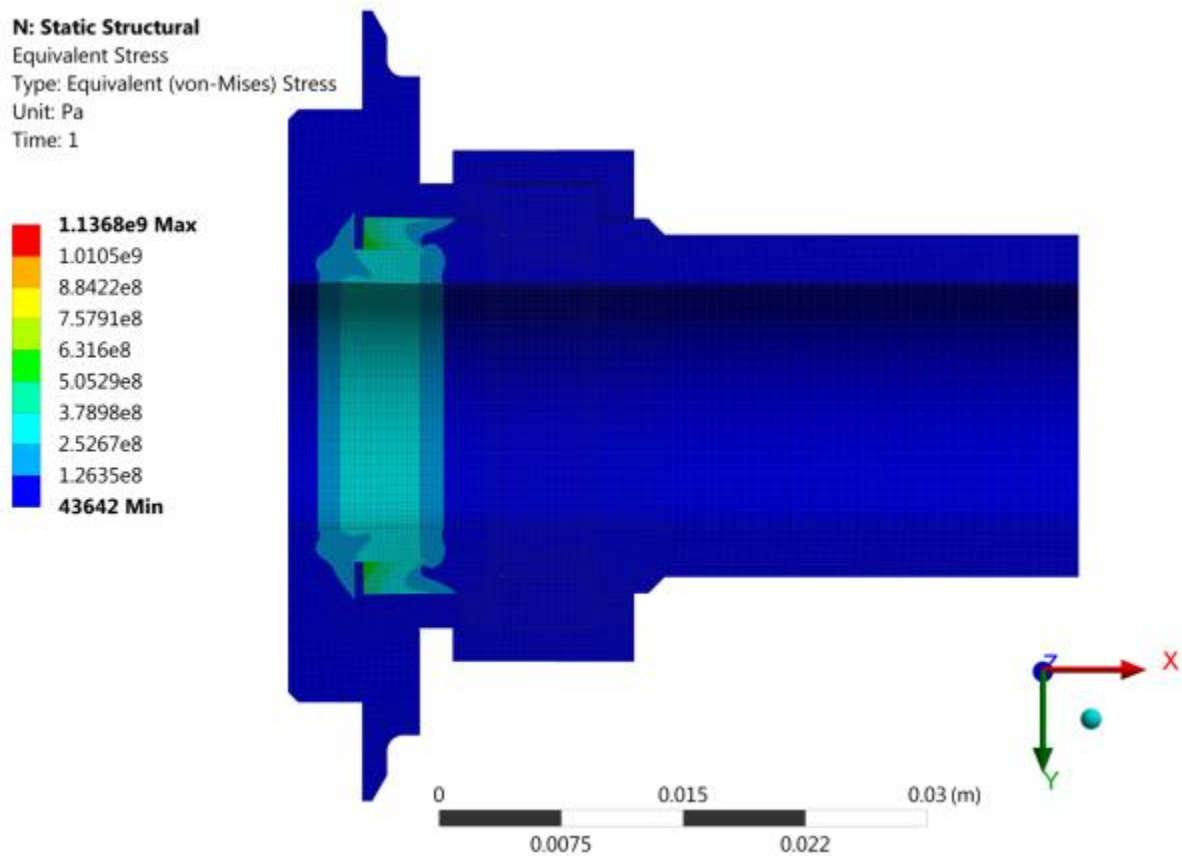


Рис.6.11 – Эквивалентные напряжения в конструкции.

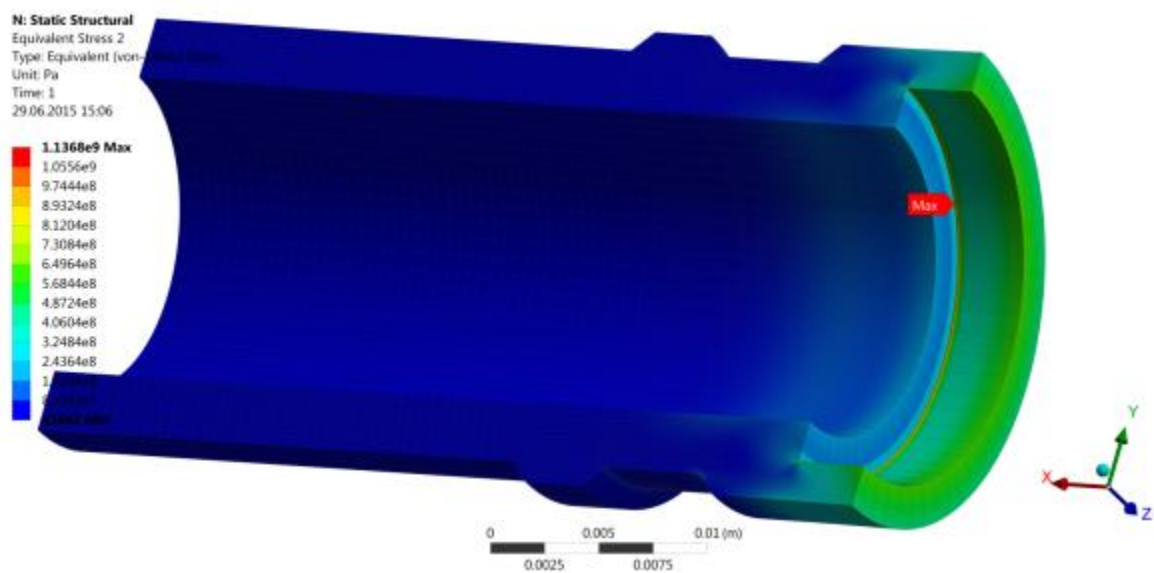


Рис. 6.12 – Поле эквивалентных напряжений камеры сгорания

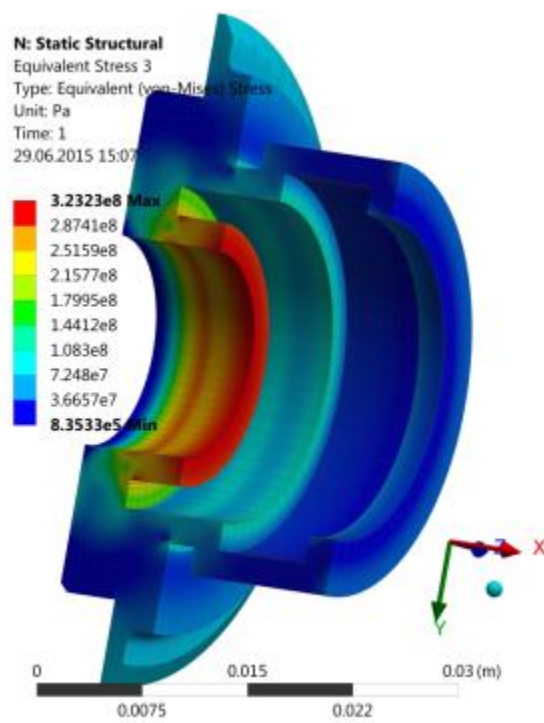
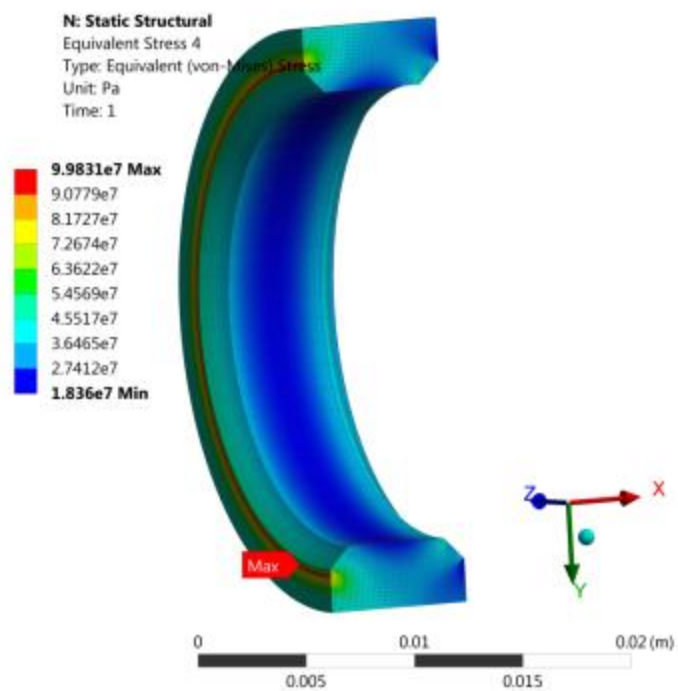


Рис. 6.13 – Поле эквивалентных напряжений
 прижимного и переходного колец.

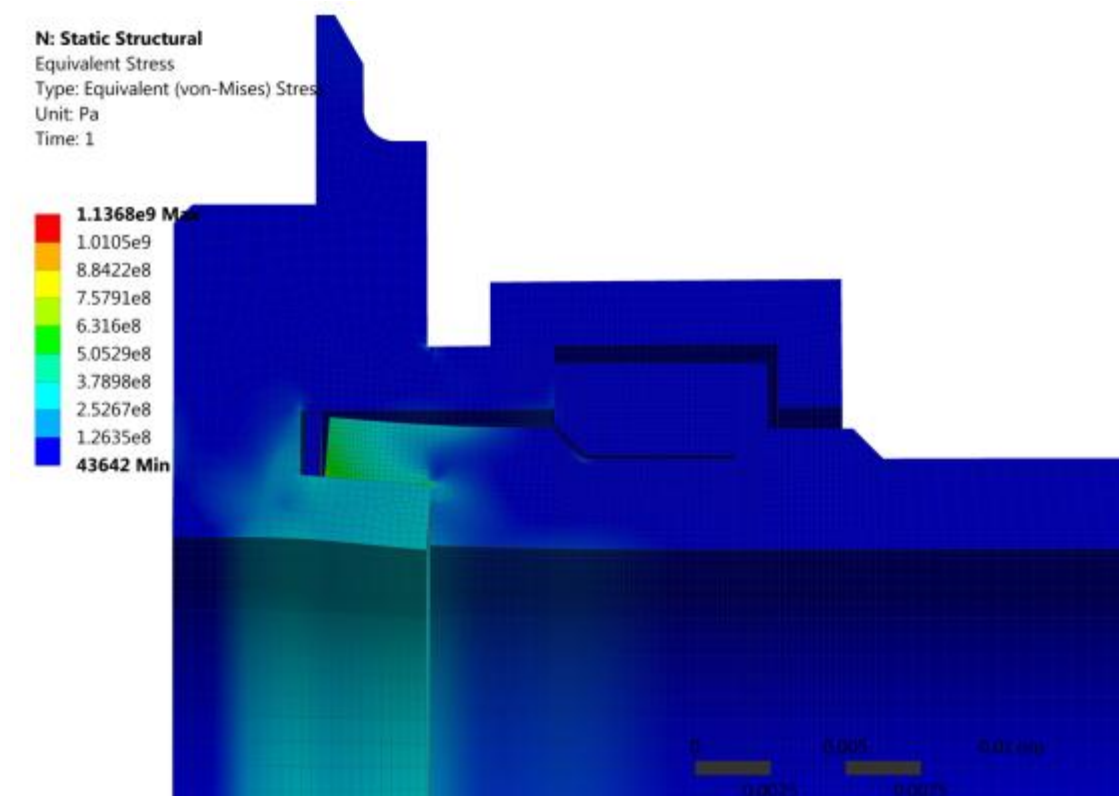


Рис.6.14– Поле эквивалентных напряжений конструкции
(в масштабе перемещений 5:1).

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;

μ - коэффициент Пуассона.

Максимальное касательное напряжение или максимальная деформация, рассчитывалась по формулам:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\gamma_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Величины напряжения или деформации:

$$\sigma_I = \max\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|\} = 2\tau_{max}$$

$$\varepsilon_I = \max\{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|, |\varepsilon_2 - \varepsilon_3|, |\varepsilon_3 - \varepsilon_1|\} = \gamma_{max}$$

Температурные напряжения:

$$\varepsilon_t = \alpha(T - T_{ref})$$

где α - коэффициент теплового расширения;

T - температура в узле;

T_{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. Отмеченное явление приводит к разрушению данного узла при циклической нагрузке.

6.1.5. Рекомендация по совершенствованию контактного узла.

При первоначальном проектировании узла стыковки композитной камеры сгорания и переходной головки, для центрирования детали 3 (Рис.6.1) 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 6.15.

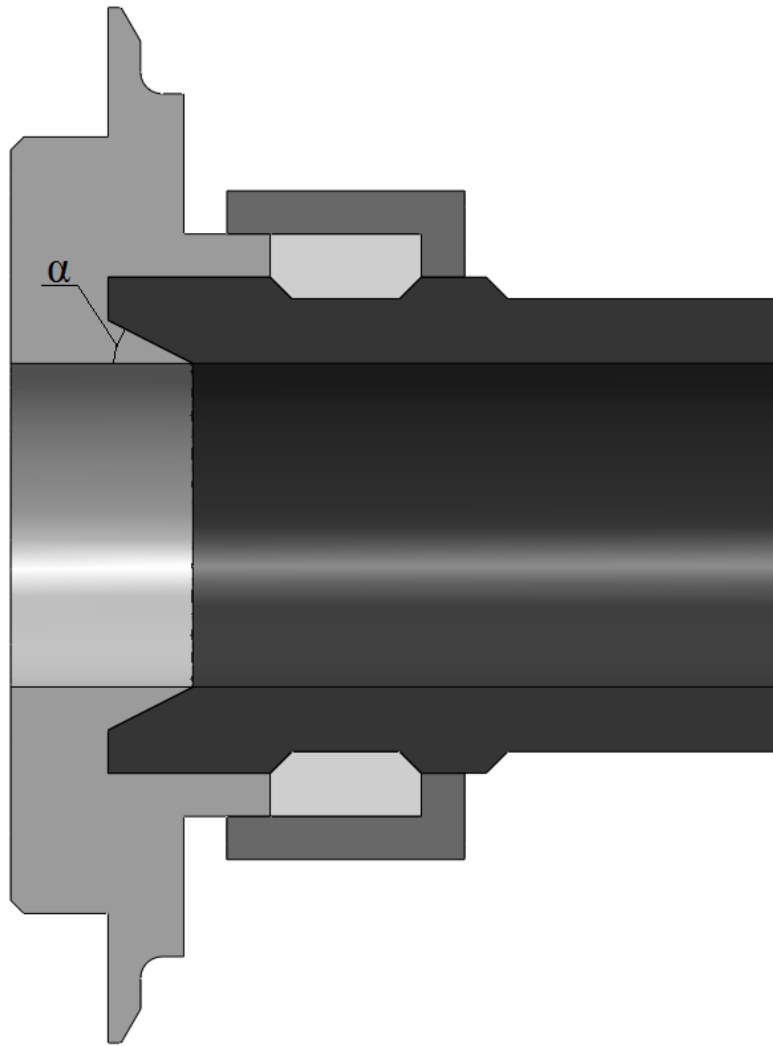


Рис.6.15. - Обновленная геометрия.

Как видно из приведенного рисунка, жесткое контактирование поверхностей было заменено на их скольжение относительно друг друга по углу сопряжения α . 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.6.16.

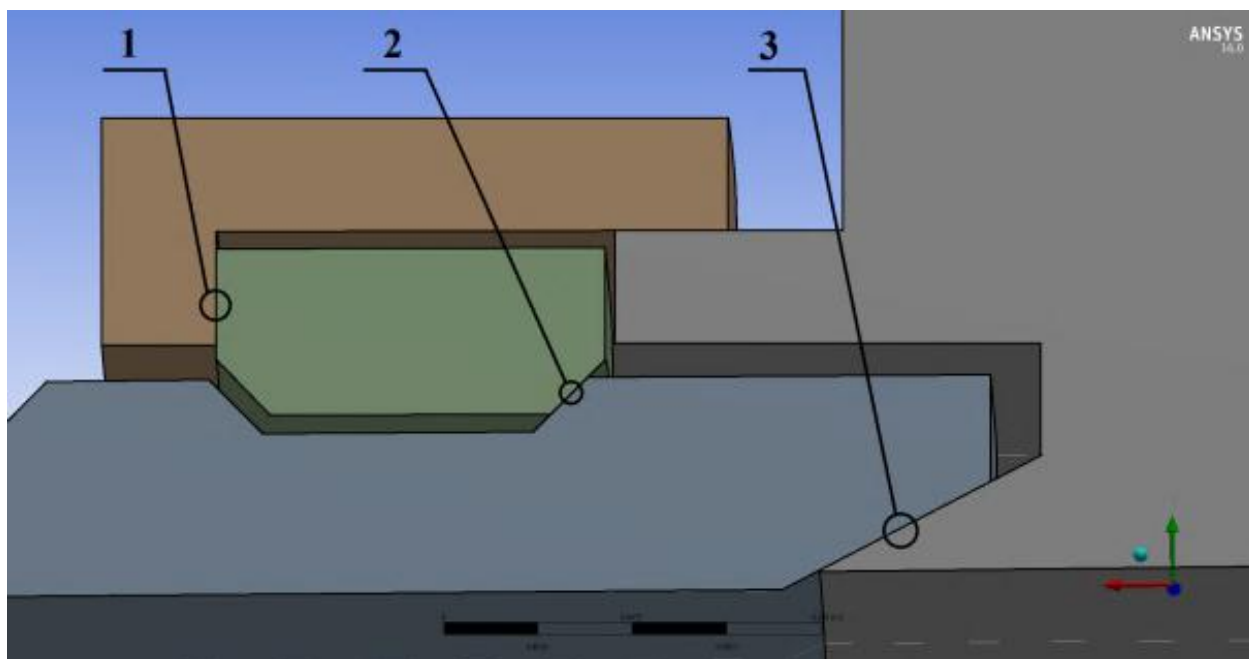


Рис.6.16 - Места фактического контакта (1 – прижимного кольца и переходного кольца, 2 - переходного кольца и камеры сгорания, 3 – переходной головки и камеры сгорания).

6.1.6 Расчет усовершенствованной геометрии

На основе предложенного решения была построена трехмерная модель для последующего анализа (Рис.6.15). Узел стыковки в данной геометрии построен таким образом, чтобы в дальнейшем была возможность изменения величины угла сопряжения.

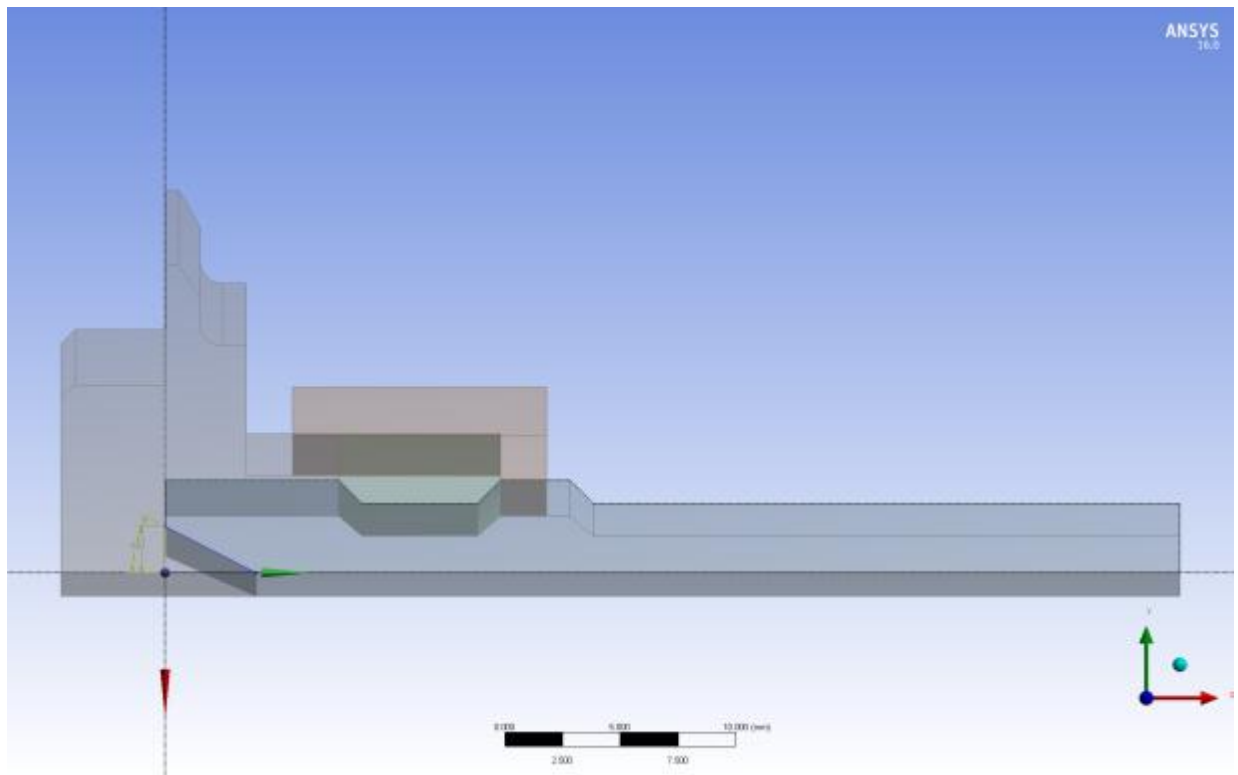


Рис.6.15. – Обновленная расчетной геометрии.

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° , а не вся конструкция.

Результат построения конечно-элементной сетки представлен на рисунке 6.16.

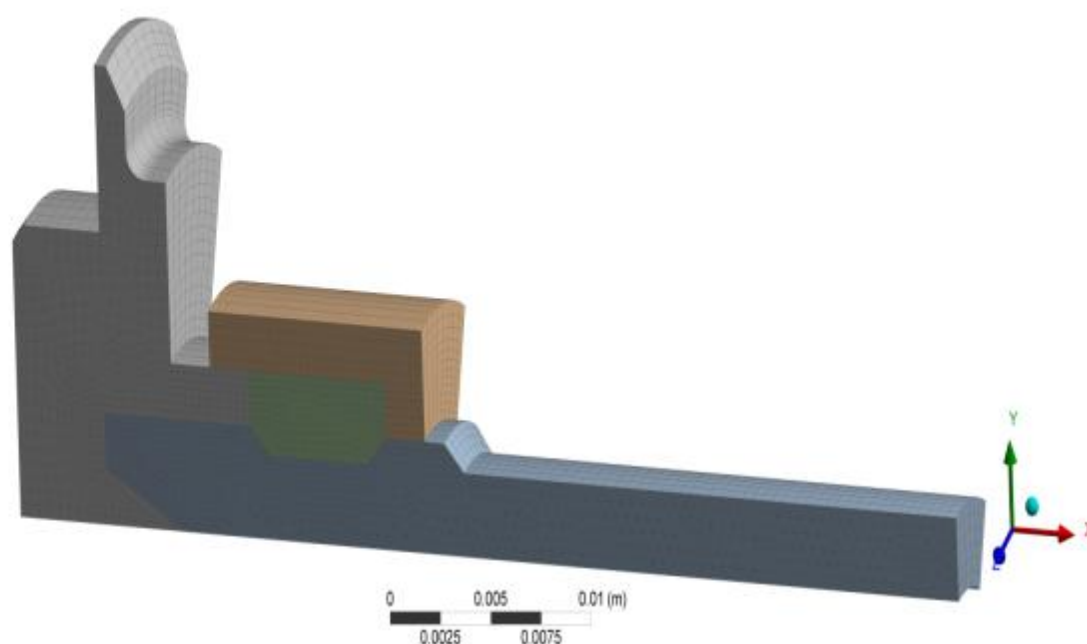


Рис.6.16 – Конечно-элементная модель для расчета.

Модели контактов между поверхностями задавались из условий, определяемых технологией сборки двигателя. Модель контактов приведена на рисунке 6.17.

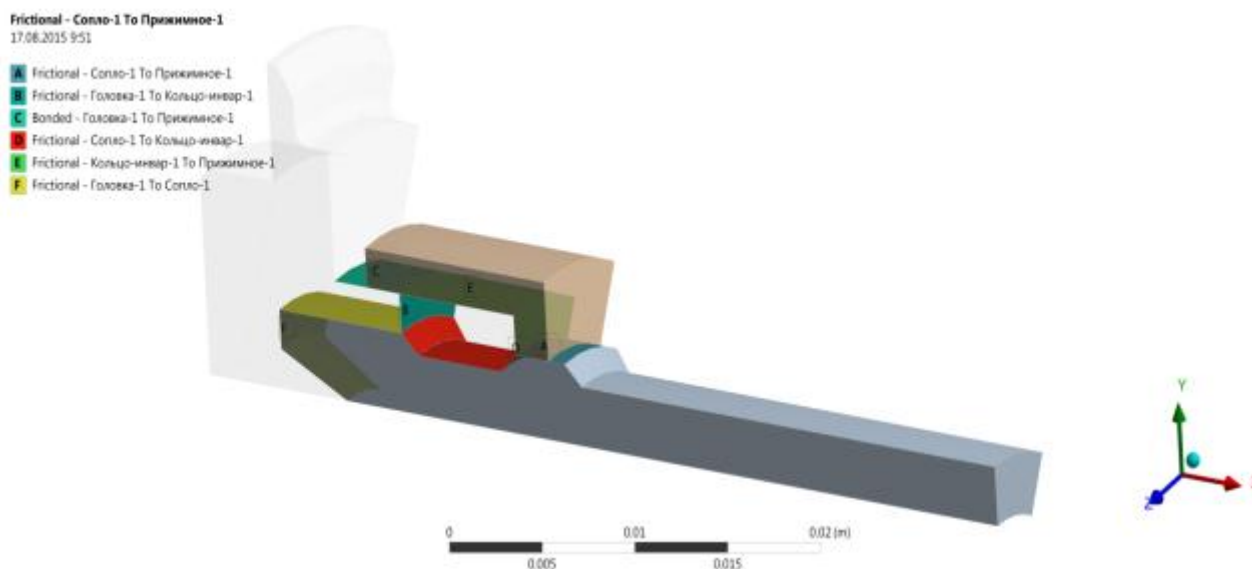


Рис. 6.17 –Модель контактов.

Значения коэффициента трения между соприкасающимися материалами взяты из таблицы 6.1.

В качестве граничных условий для теплового расчета были указаны A - тепловой поток в стенку камеры сгорания $q = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м², B , C – излучение в окружающую среду с поверхности изделия. Степень черноты материалов принималась равной 0,8. (Рис.6.18)

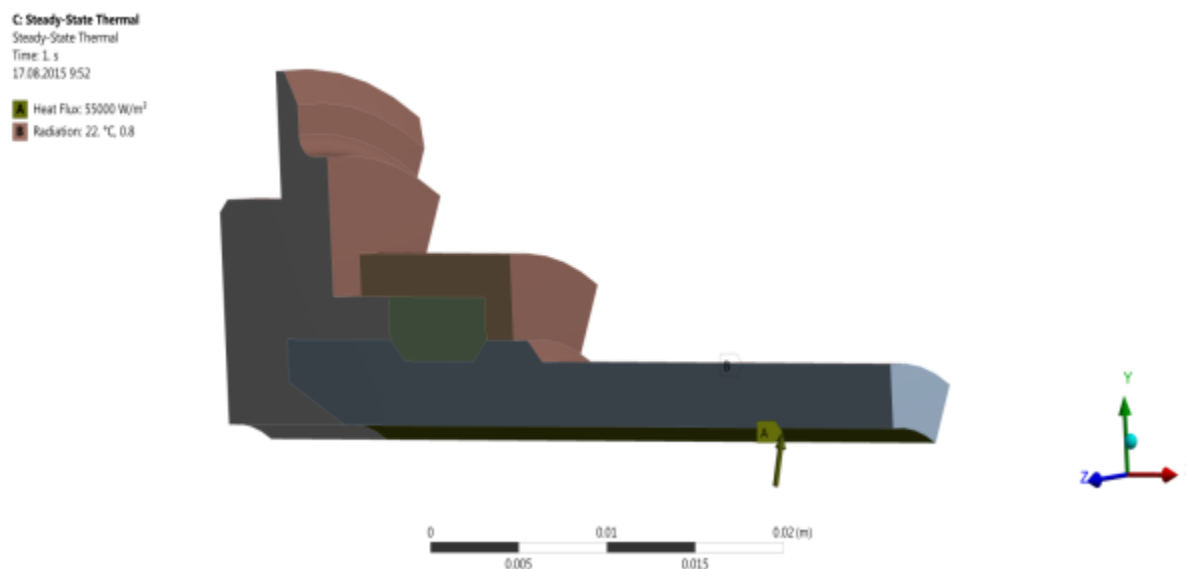


Рис.6.18. – Установка граничных условий.

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.6.19-6.22).

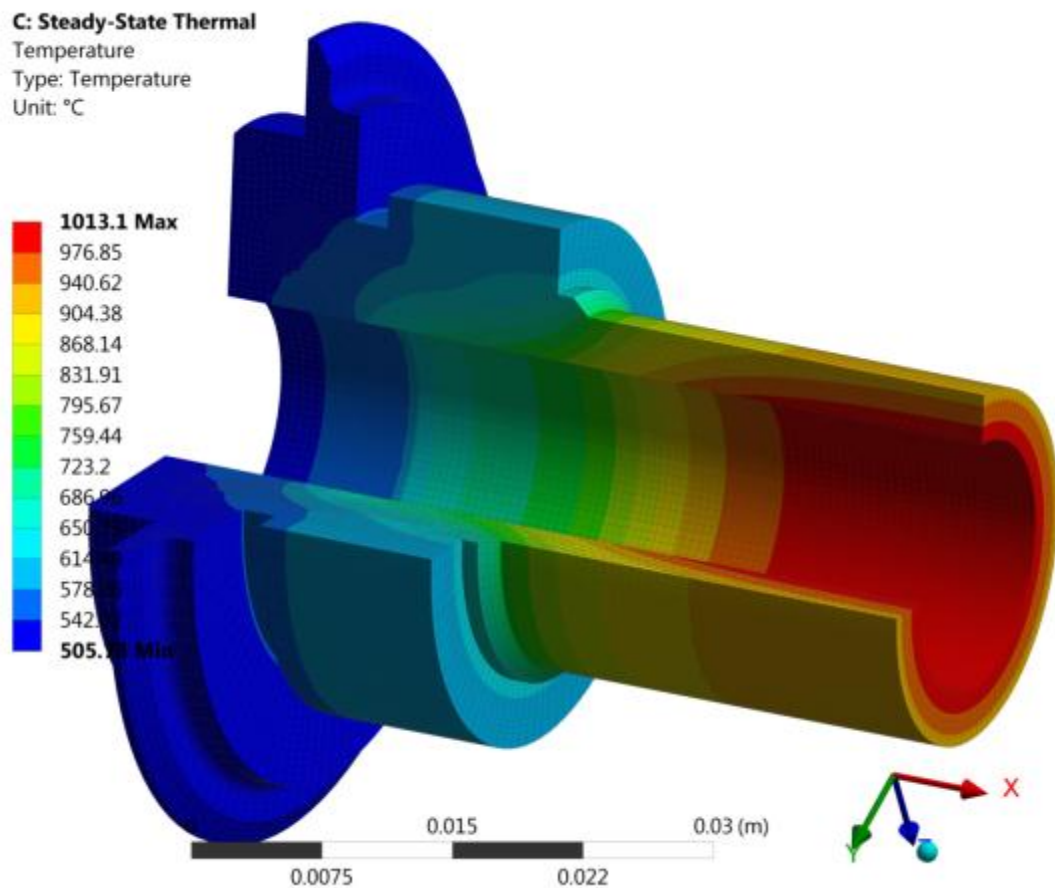


Рис.6.19. – Температурное поле конструкции.

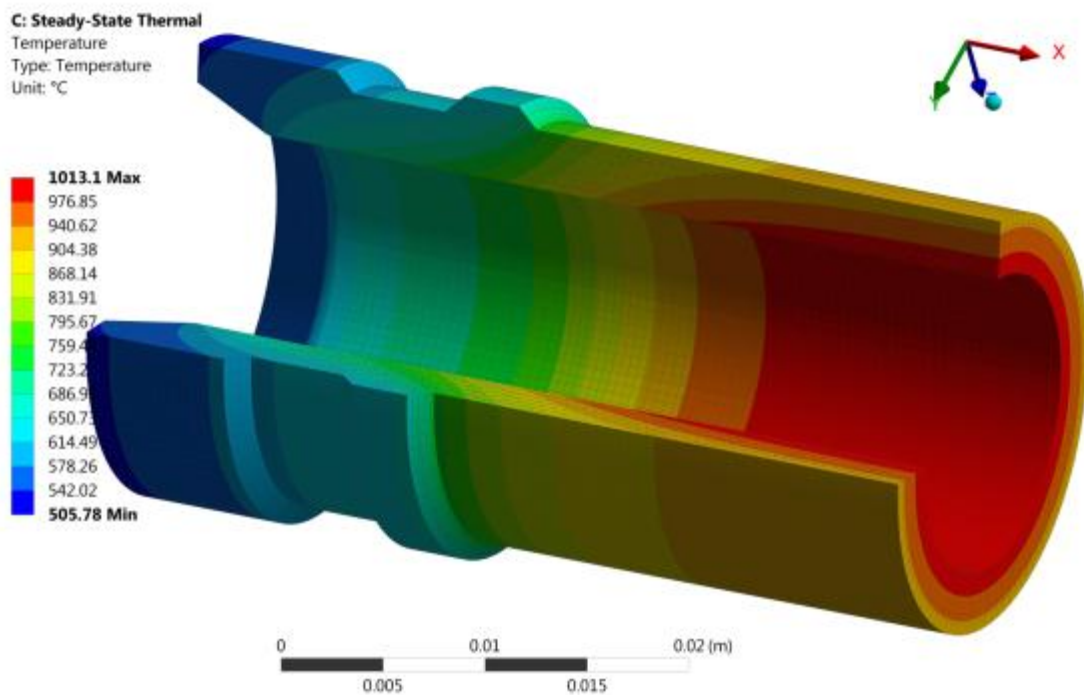


Рис.6.20. – Температурное поле в композитной камере сгорания.

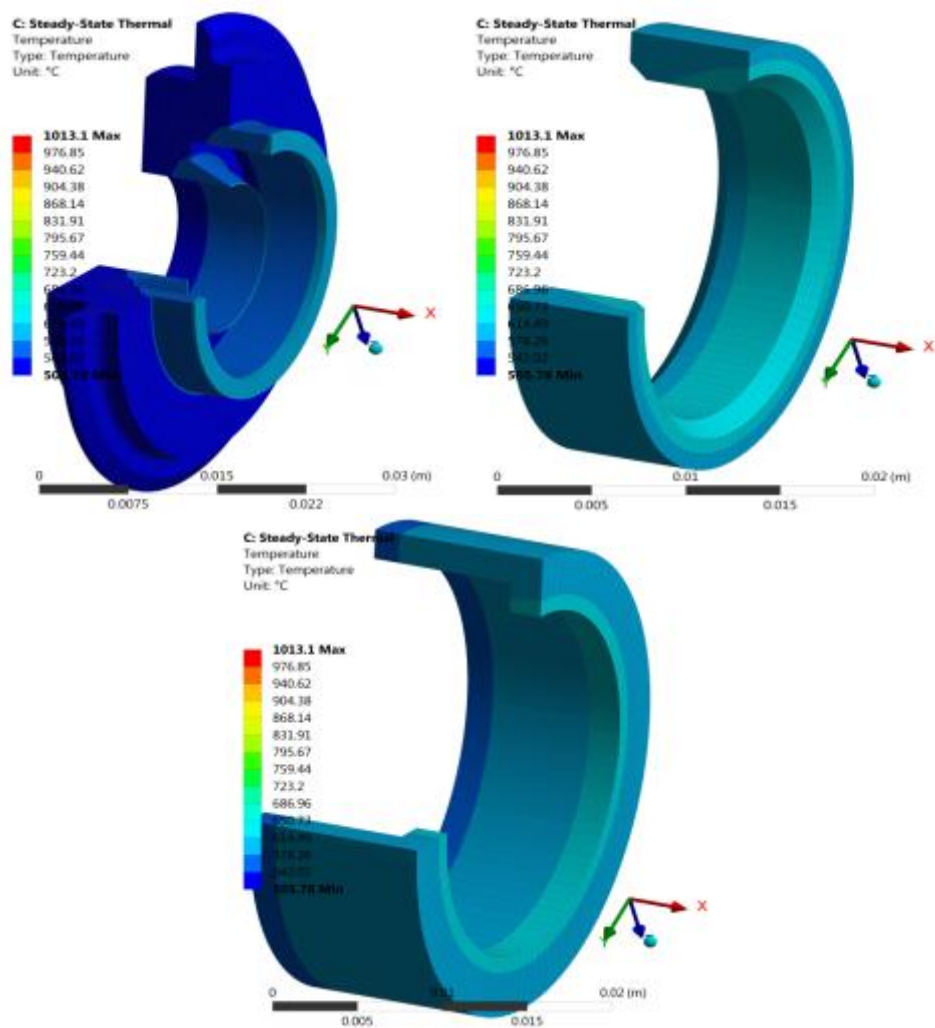


Рис.6.21. – Температурное поле переходной головки, переходного и прижимного колец.

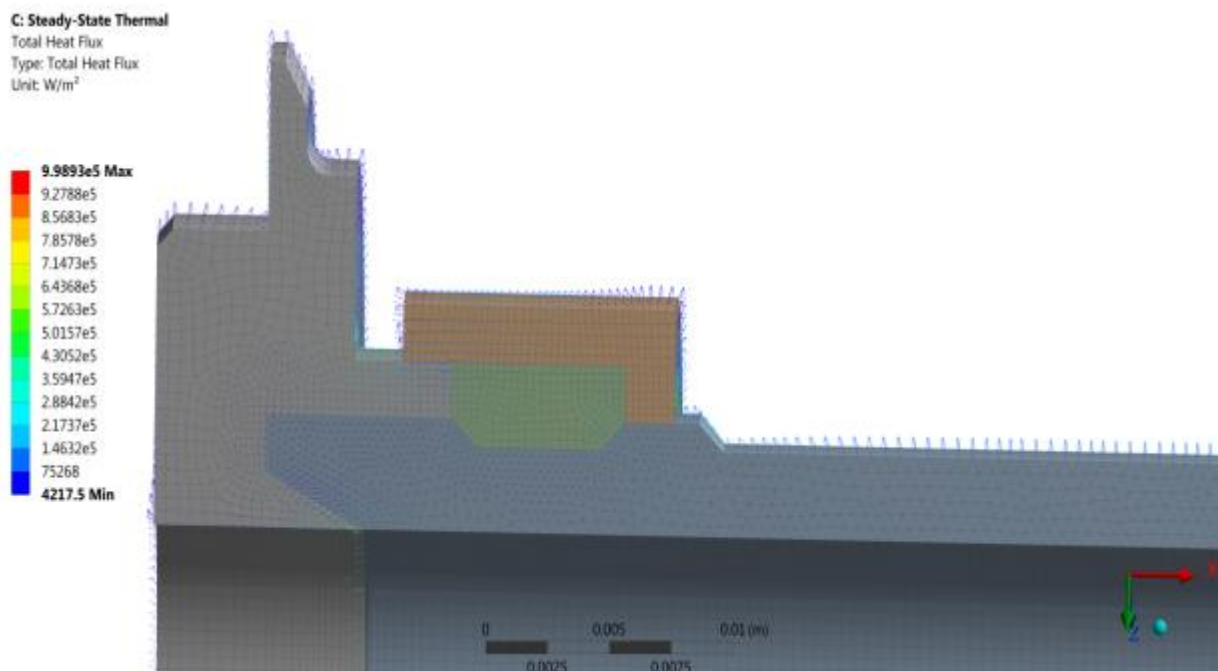


Рис.6.22. – Направление и величина тепловых потоков в конструкции.

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.6.23-6.39).

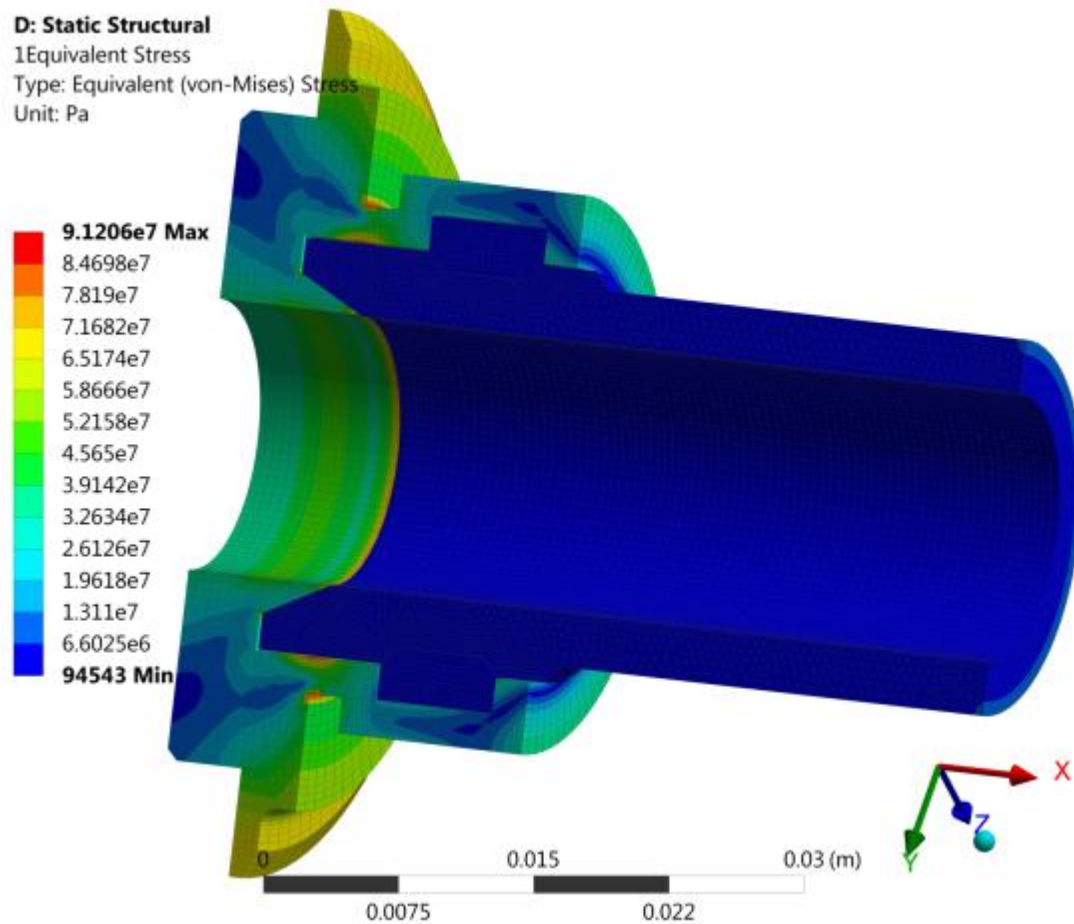


Рис.6.23. – Эквивалентные напряжения в конструкции.

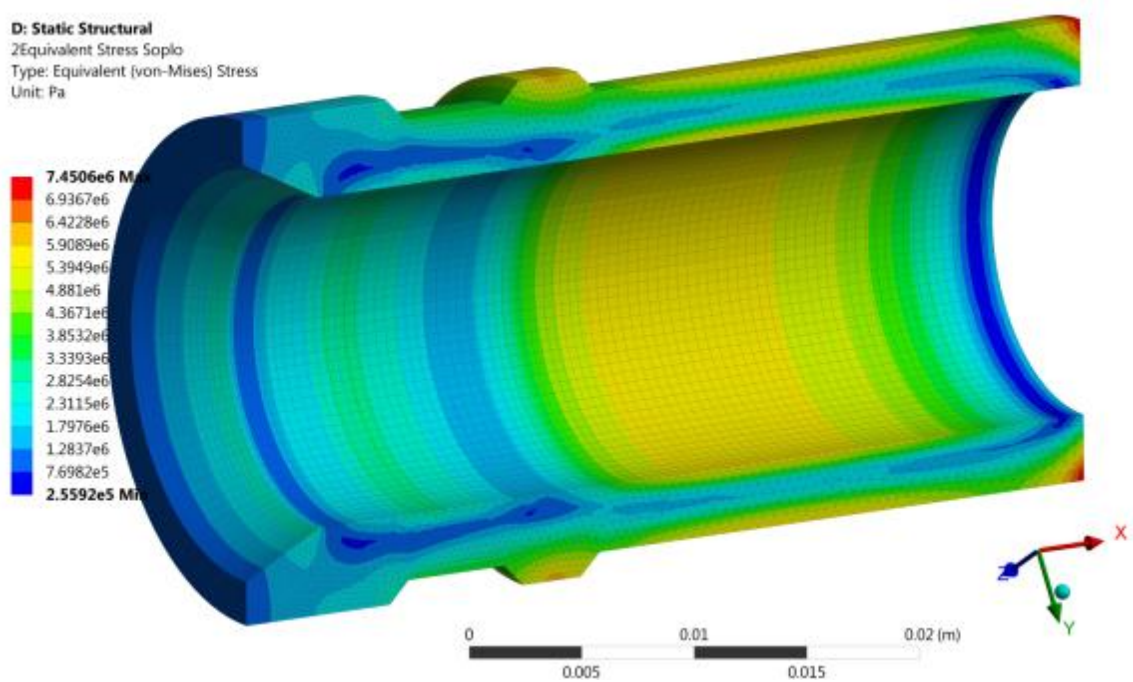


Рис. 6.24. – Поле эквивалентных напряжений камеры сгорания.

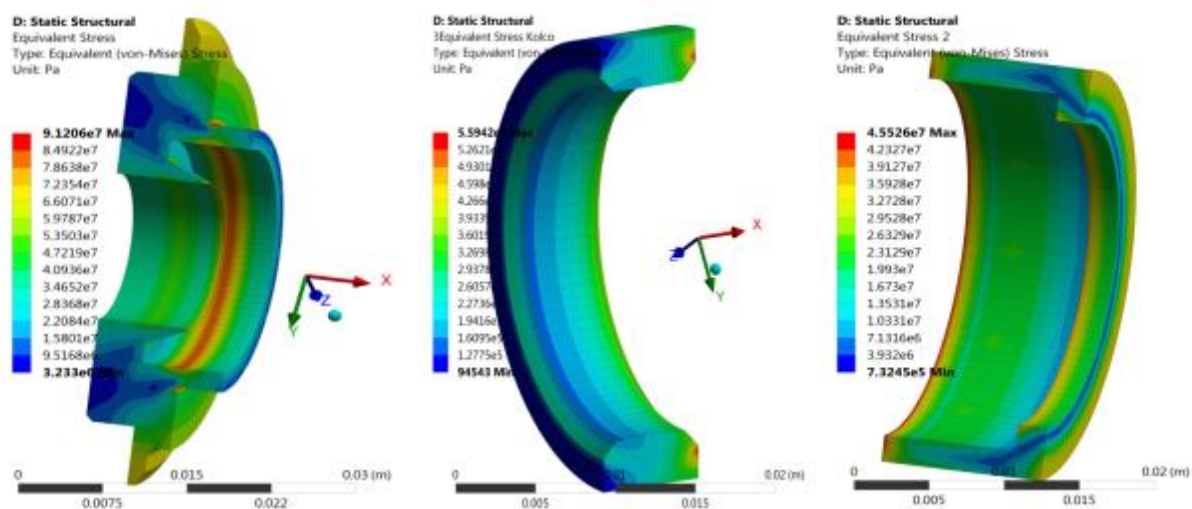


Рис. 6.25. – Поле эквивалентных напряжений прижимного и переходного колец.

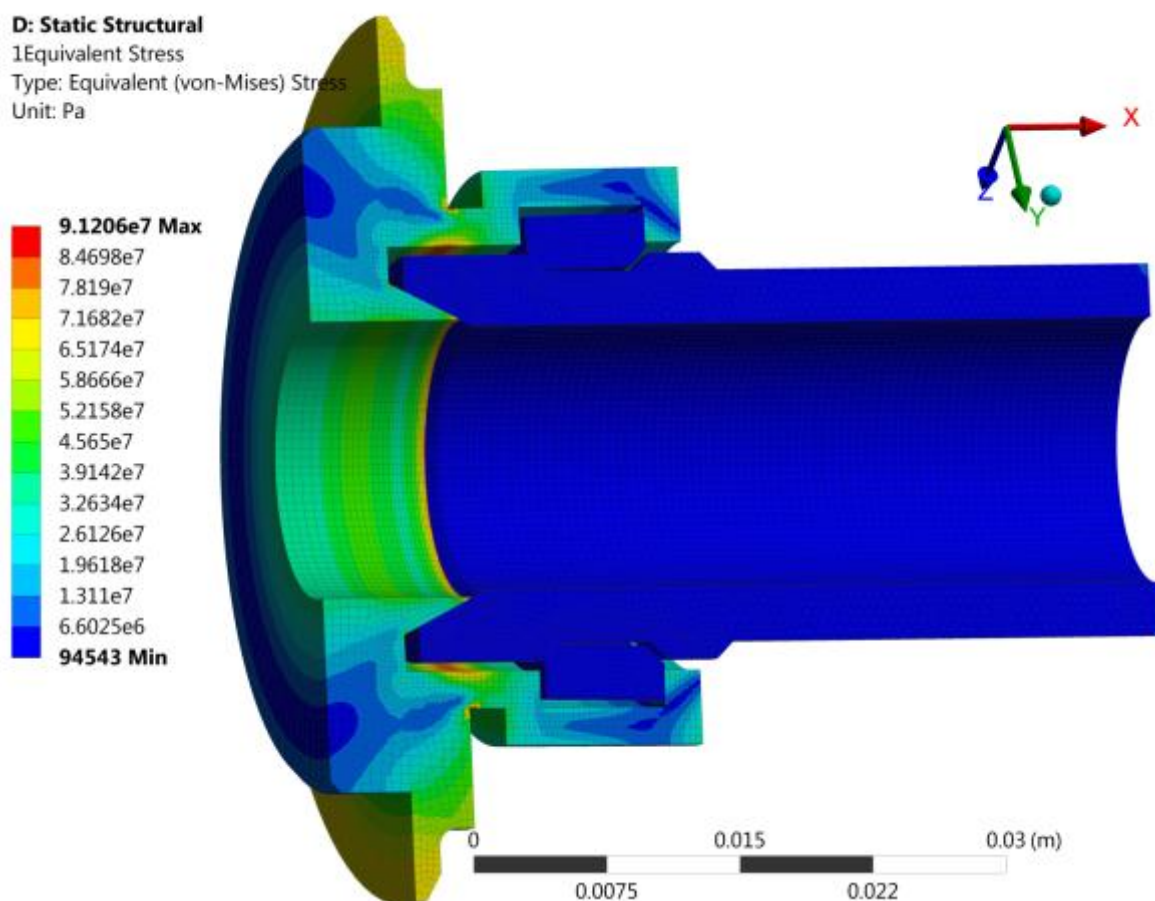


Рис.6.26.– Поле эквивалентных напряжений конструкции
(в масштабе перемещений 5:1).

На рисунках 6.23 – 6.26 приведены результаты расчета для значения угла сопряжения 27° . Подобные расчеты были выполнены для различных значений

углов α (15° , 30° , 45° , 60°) была отмечена тенденция к уменьшению значения межконтактного давления на величинах углов от 15° до 35° . Для этого диапазона углов был выполнен расчёт, в котором за параметр выбран угол α , по которому происходит скольжение деталей. В результате расчёта были найдены величины эквивалентных напряжений и давлений в зонах контакта в зависимости от величины угла α . 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 рисунках 6.27 – 6.30.

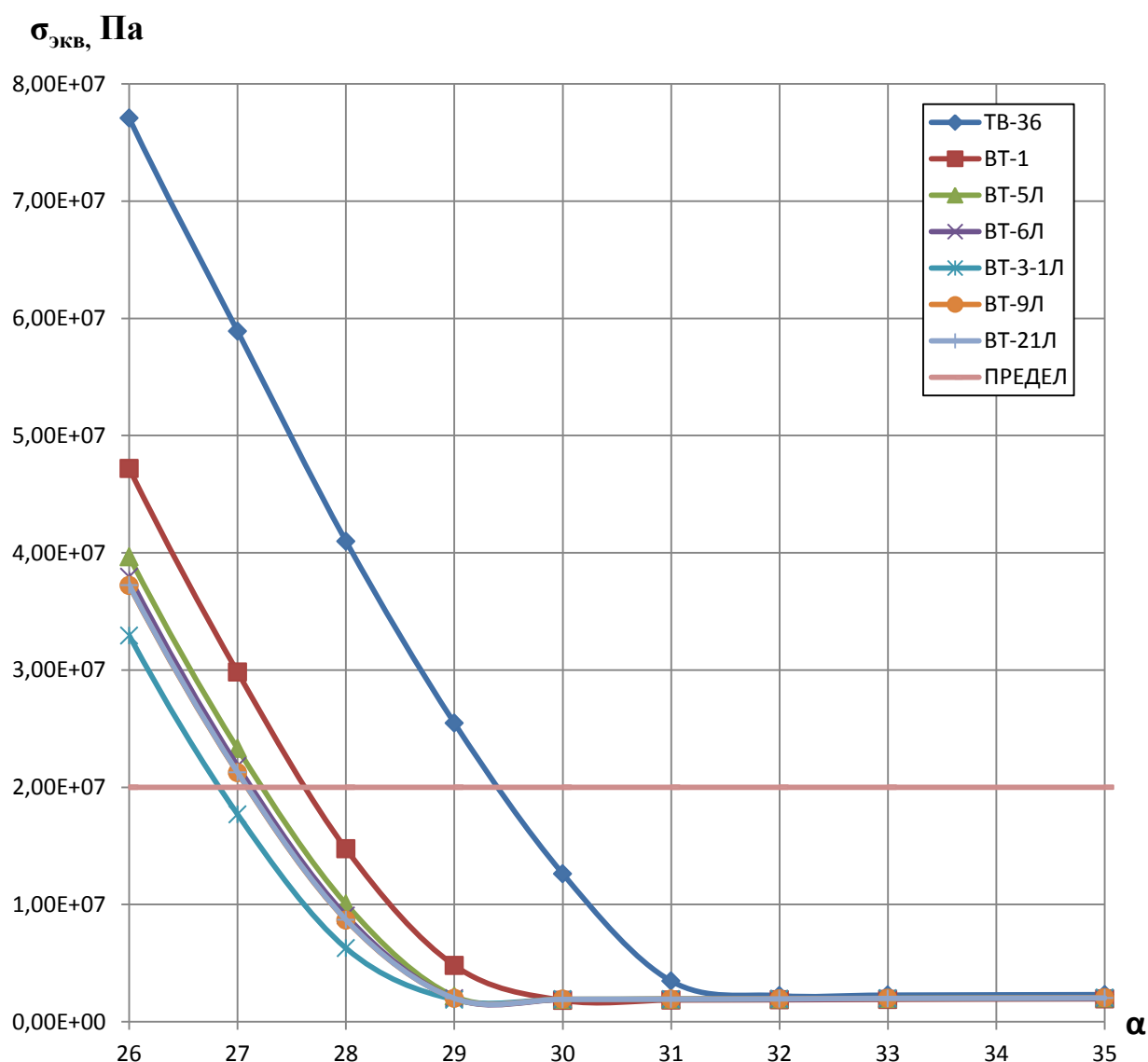


Рис.6.27. - График зависимости эквивалентных напряжений в композитной камере сгорания от угла сопряжения α .

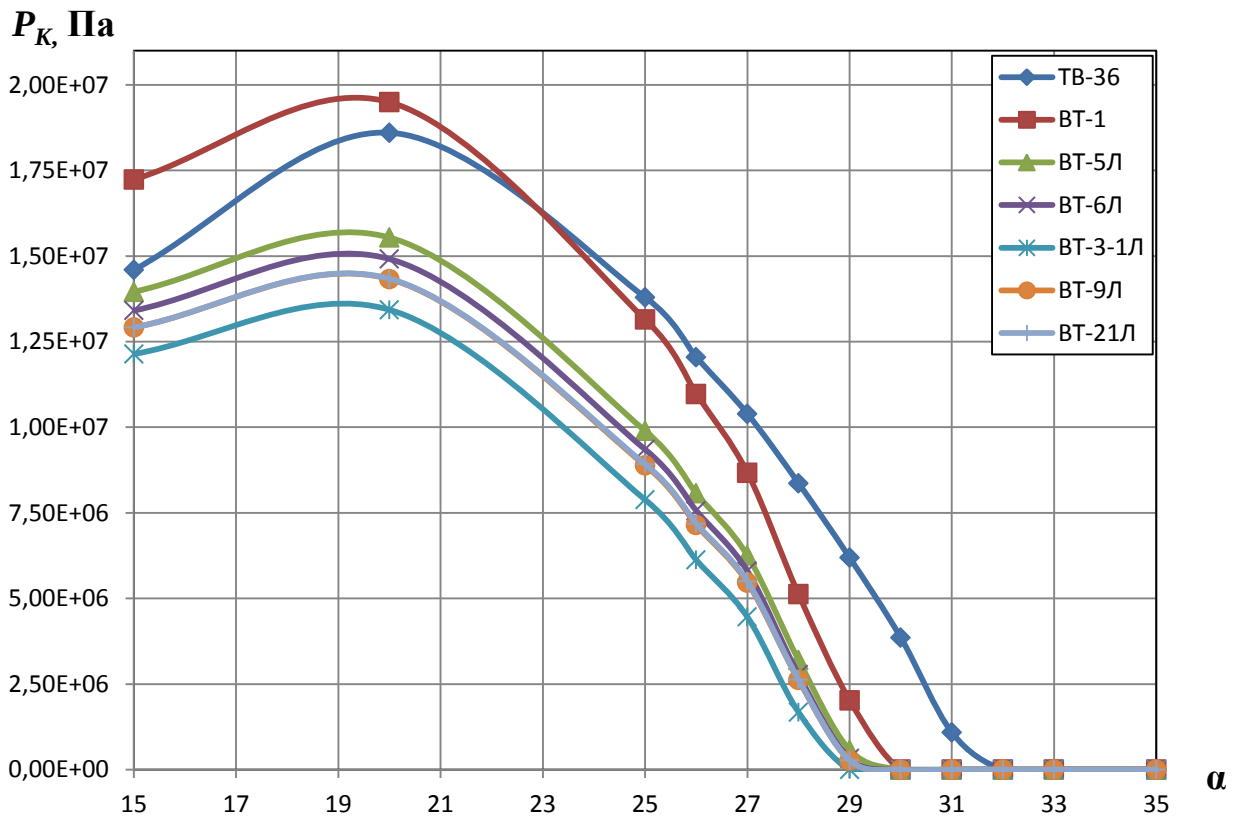


Рис.6.28. - График зависимости давлений P_K в зоне контакта 1 от угла сопряжения α .

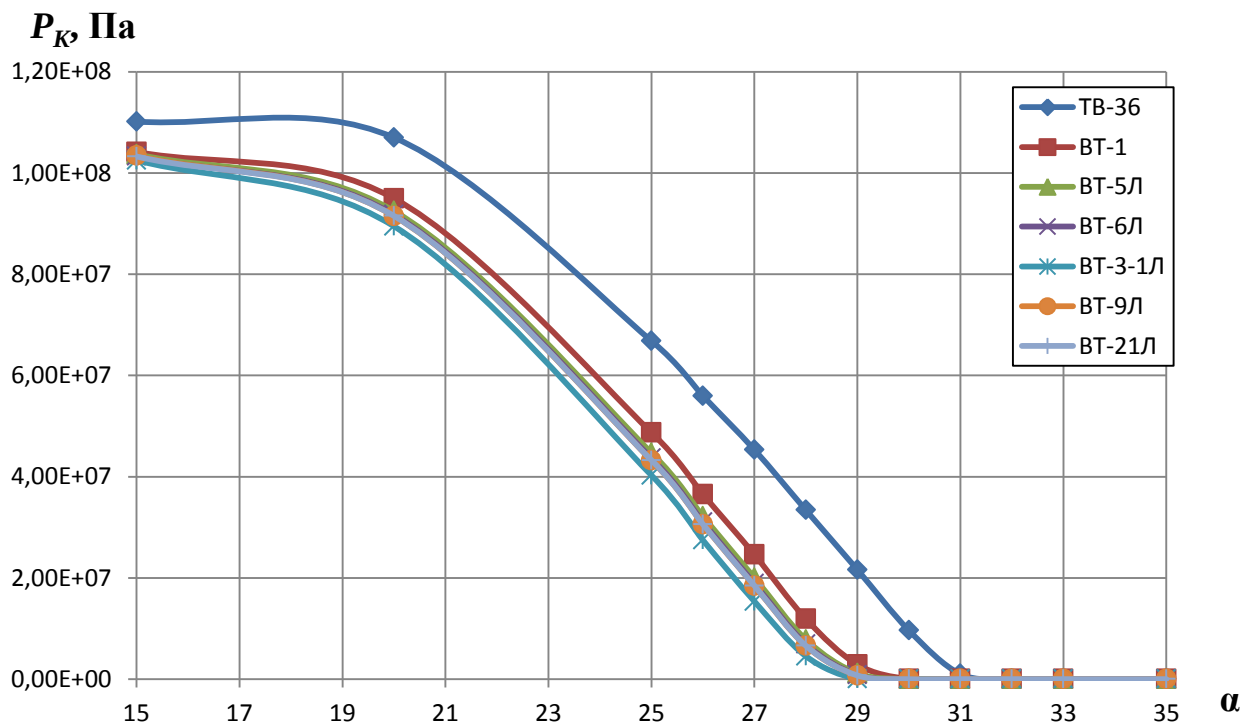


Рис.6.29. - График зависимости давлений P_K в зоне контакта 2 от угла сопряжения α .

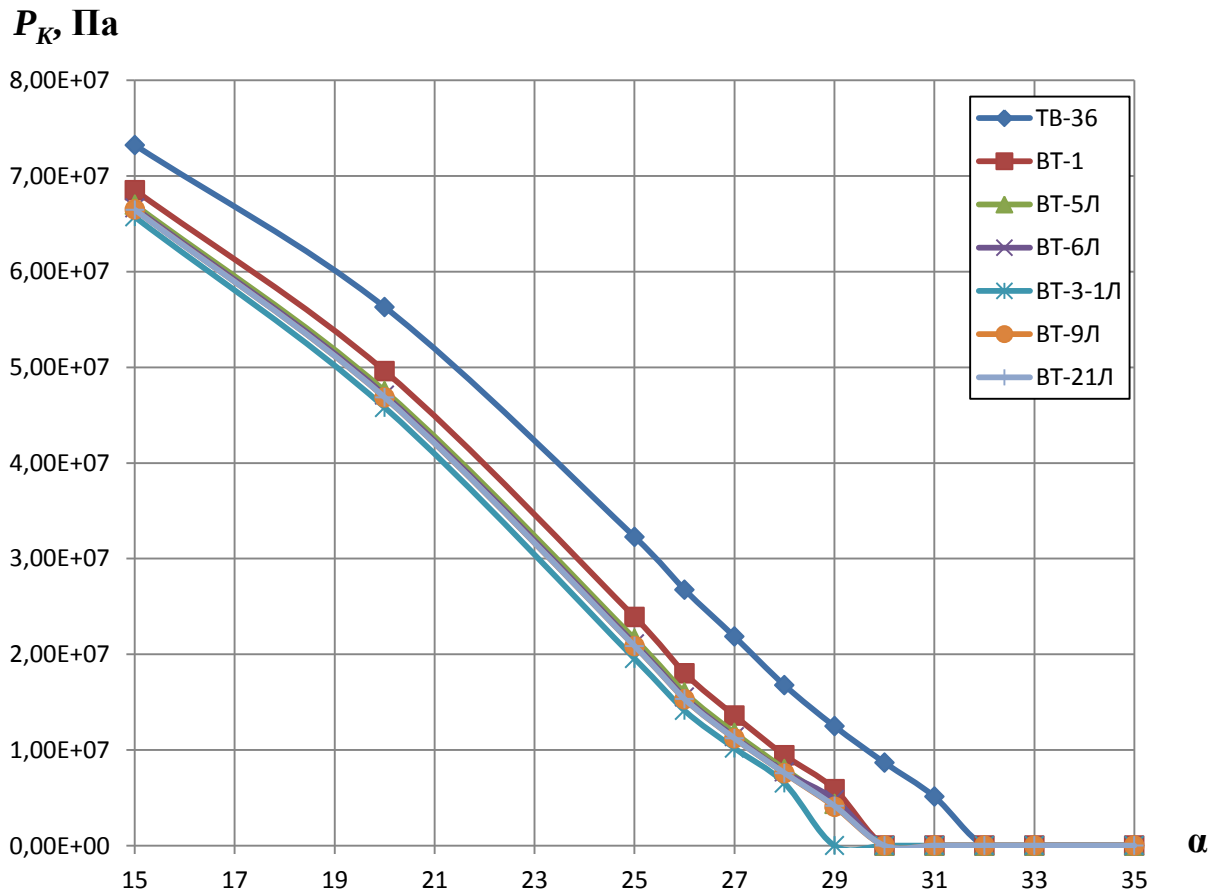


Рис.6.30. - График зависимости давлений P_K в зоне контакта 3 от угла сопряжения α .

По результатам расчета, представленным на рисунках можно сделать вывод, что для рассматриваемой конструкции предпочтительные значения угла α лежат в диапазоне углов от 27° до 29° .

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 неидельностью 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.

6.2. Расчет контактного термического сопротивления в областях контакта деталей.

6.2.1. 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 рисунках 6.31 и 6.32.



Рис.6.31. – Установка композитной камеры сгорания в клиновом держателе.



Рис.6.32. – 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 рисунках 6.33, 6.34.

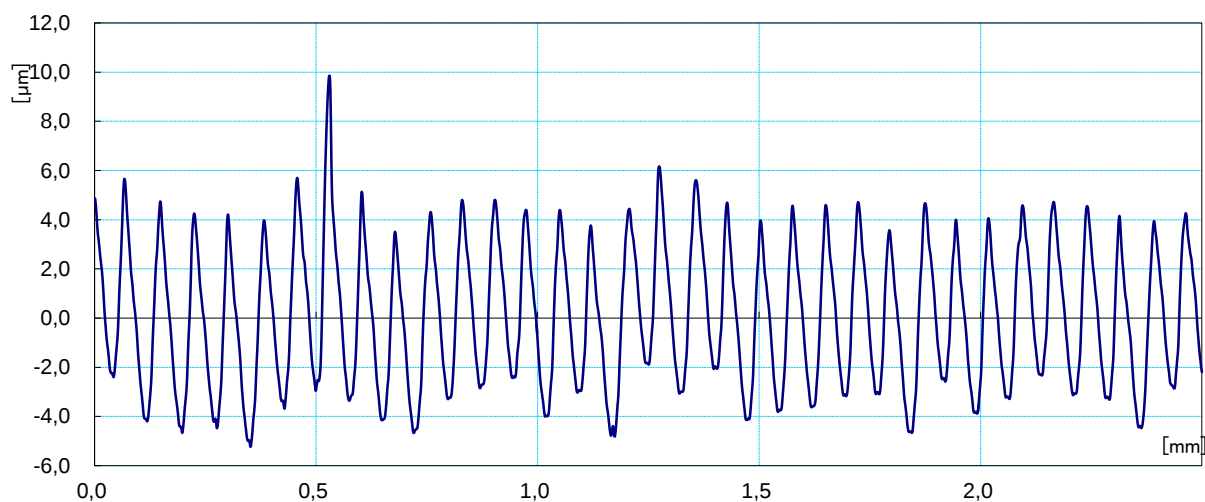


Рис.6.33. – Шероховатость поверхности переходного кольца.

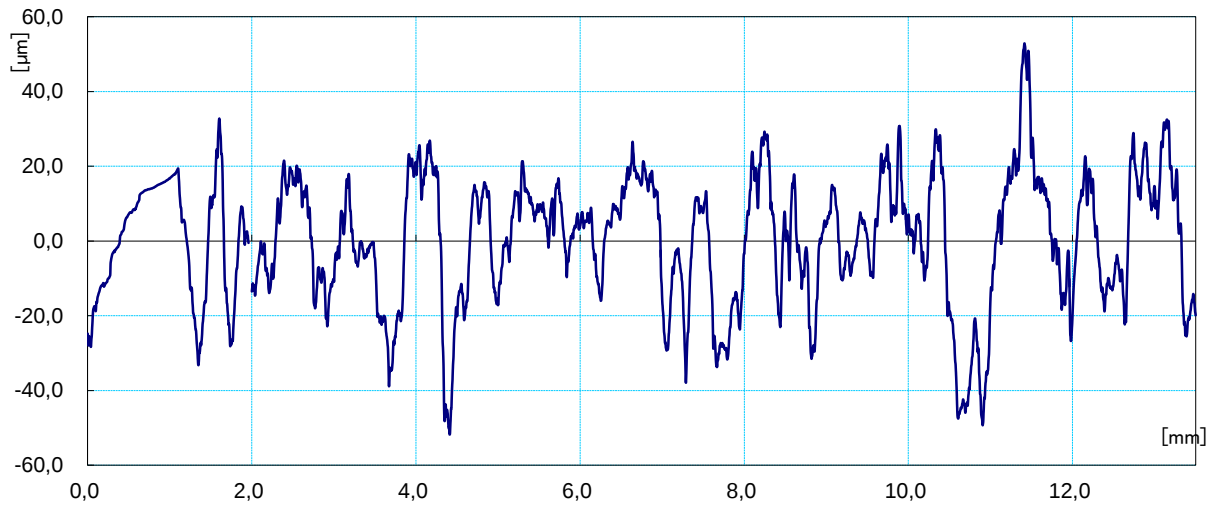


Рис.6.34. - Шероховатость поверхности композитной камеры сгорания.

Для наглядности, на рисунках 6.35, 6.36 выполнено перестроение графиков в одной интервальной шкале.



Рис.6.35. – Шероховатость камеры сгорания на интервале 2мм.

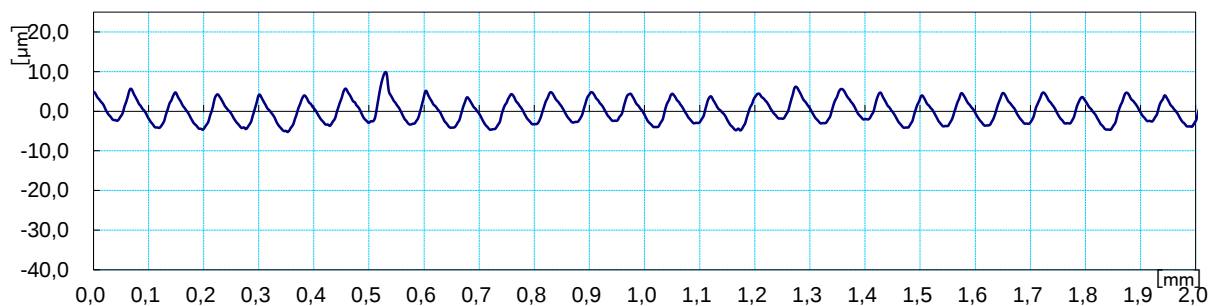


Рис.6.36. – Шероховатость переходного кольца на интервале 2мм.

Как видно из приведенных графиков (Рис.6.35, 6.36) 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.6.37)

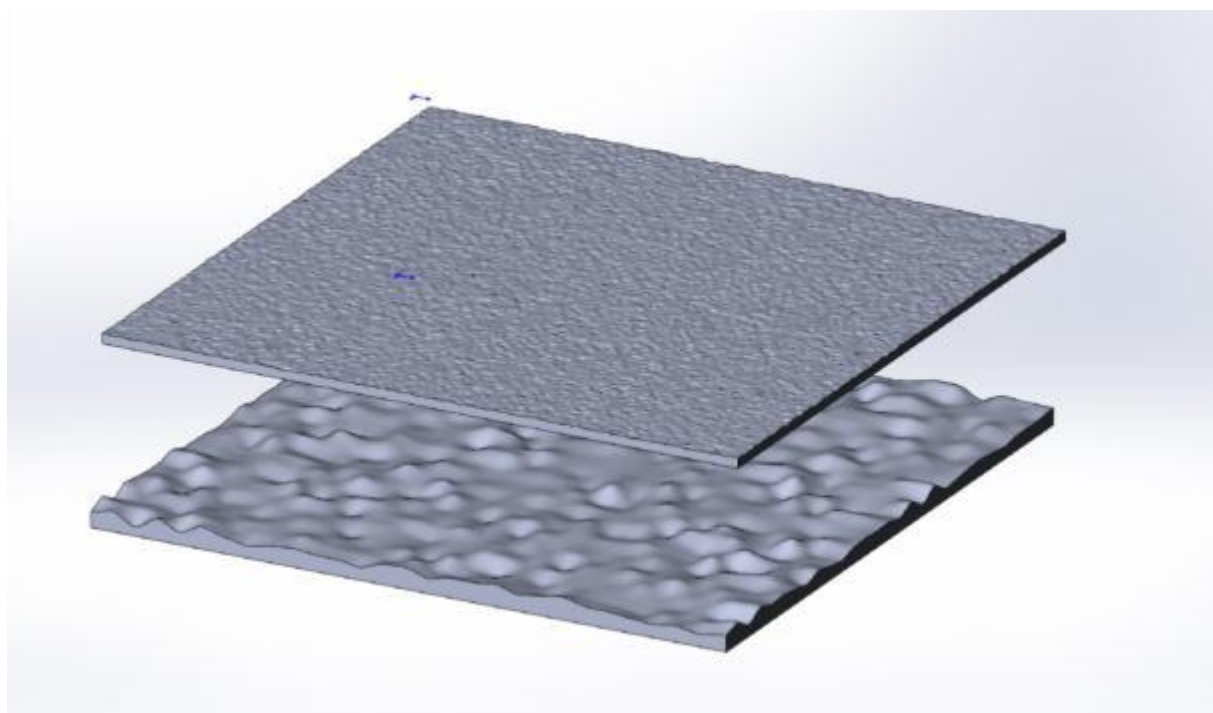


Рис.6.37 – Шероховатость поверхности (сверху-вниз) ТВ-36 и КМК-МС.

Результаты построения сеточных моделей шероховатых поверхностей представлены на рисунках 6.37 - 6.38.

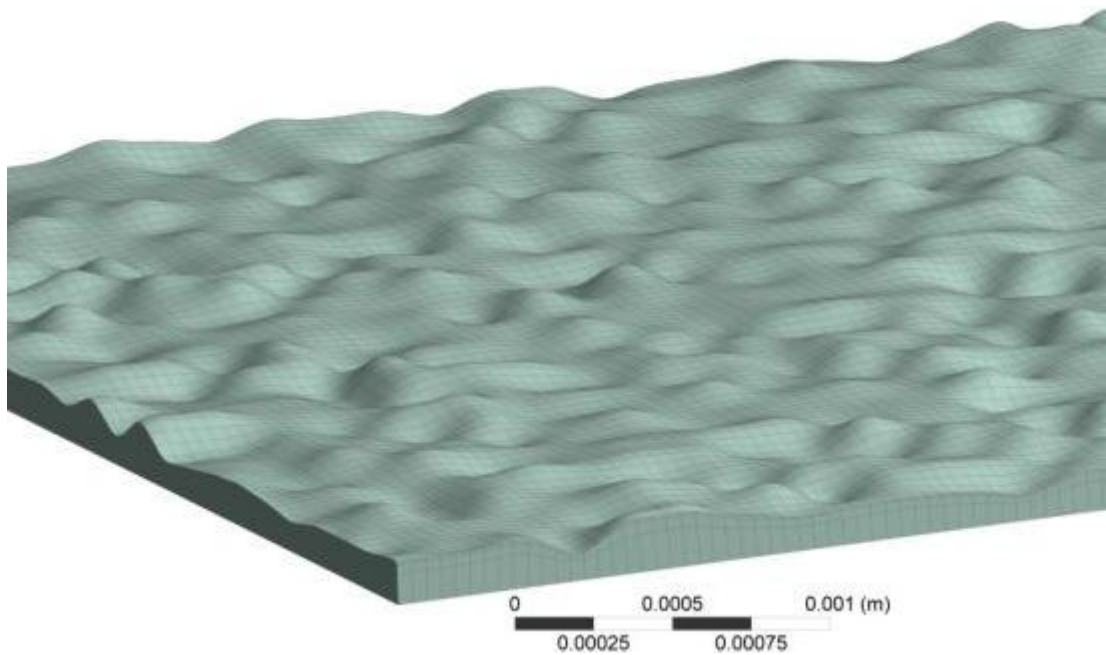


Рис. 6.37. – Сеточная модель шероховатости с $R_q=12.27$ мкм (изометрия).

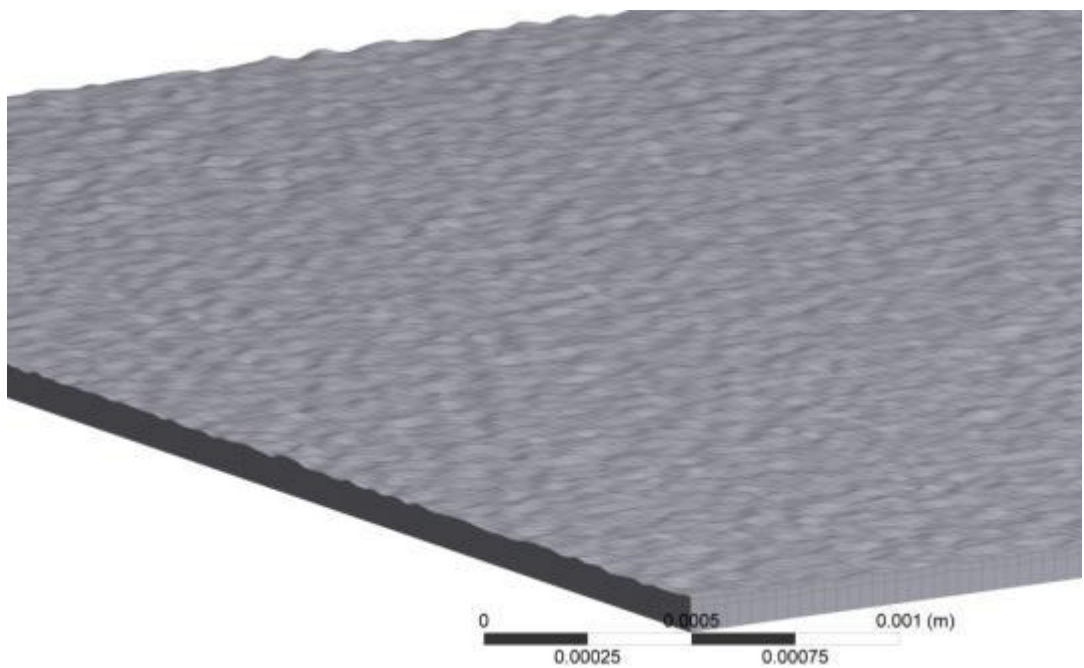


Рис. 6.38. – Сеточная модель шероховатости с $R_q=2.45$ мкм (изометрия).

6.2.2. 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. 6.39).

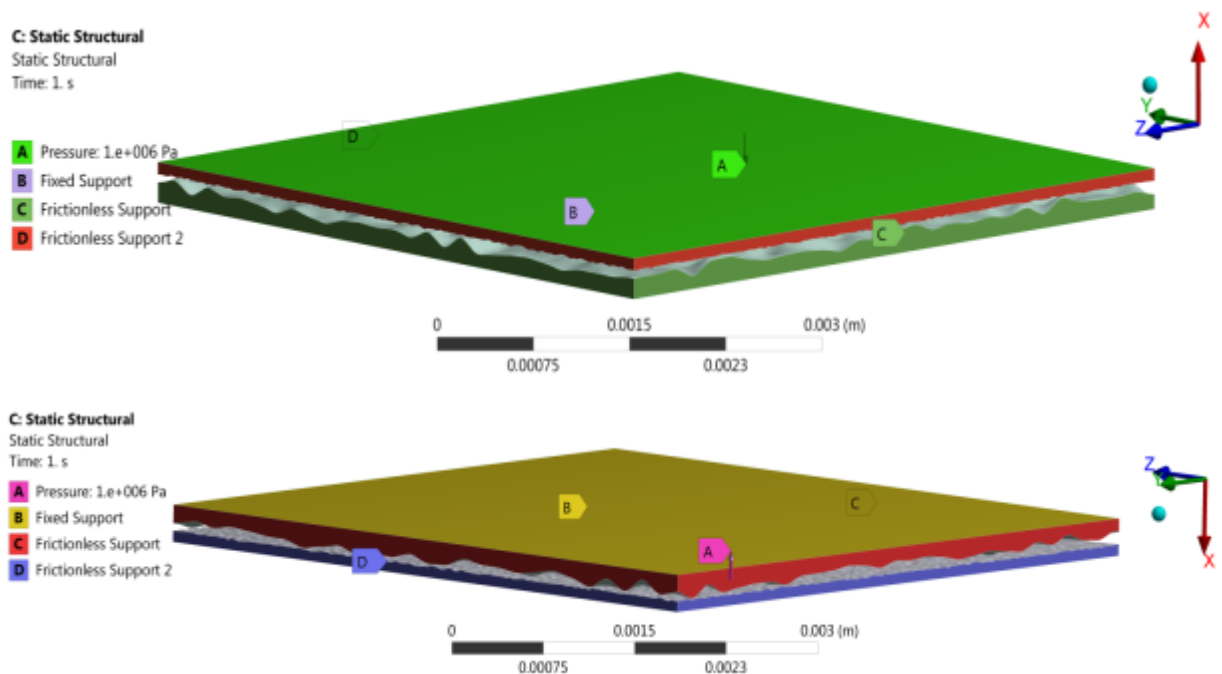


Рис. 6.39. – Установка граничных условий.

По результатам прочностного анализа получены значения эквивалентных напряжений (Рис.6.40) и межконтактного давления, величина проникновения поверхности одной детали в поверхность другой детали.

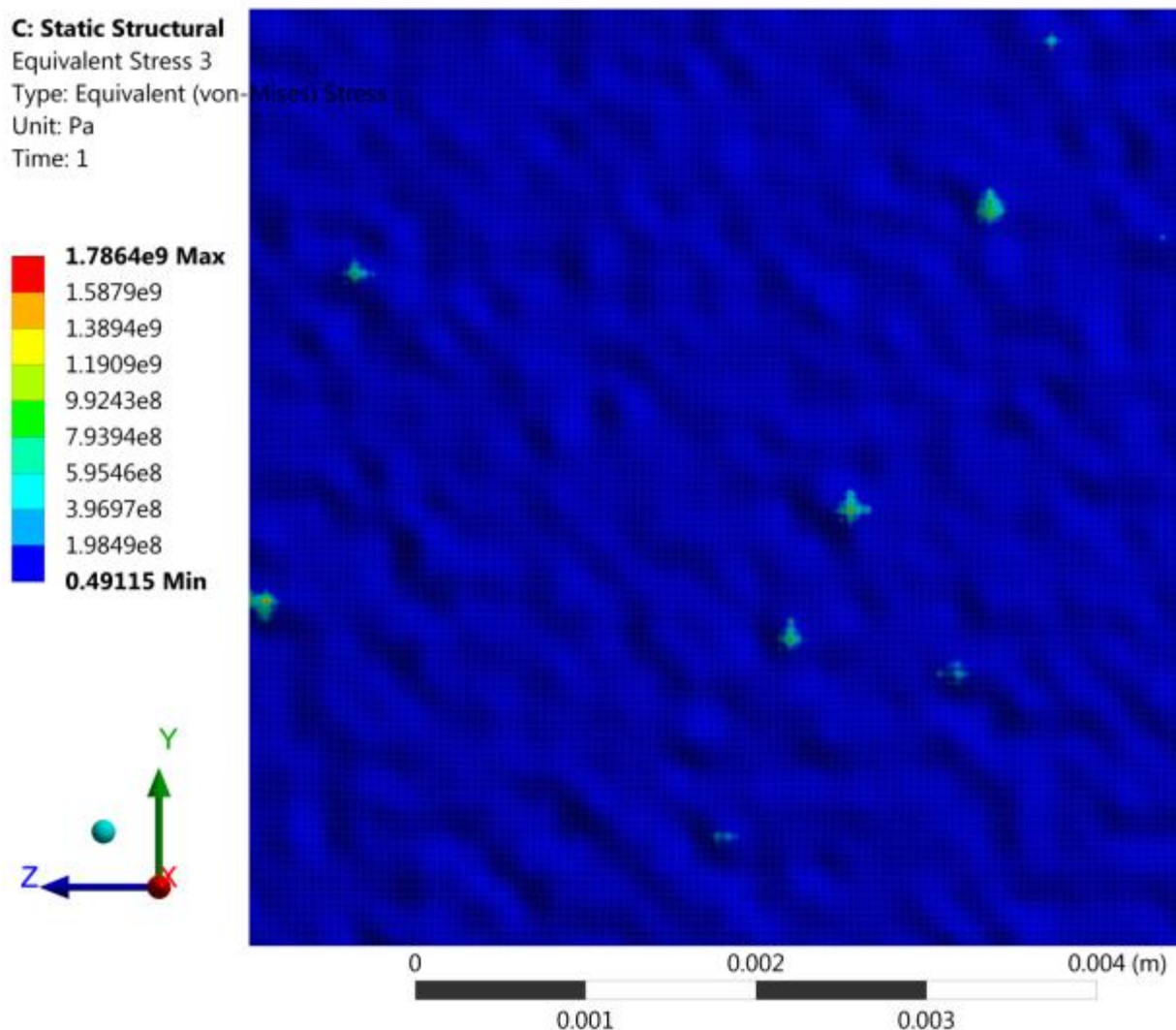


Рис. 6.40. – Поле эквивалентных напряжений на поверхности КМК-МС для приложенного давления 10^6 Па.

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 6.41.

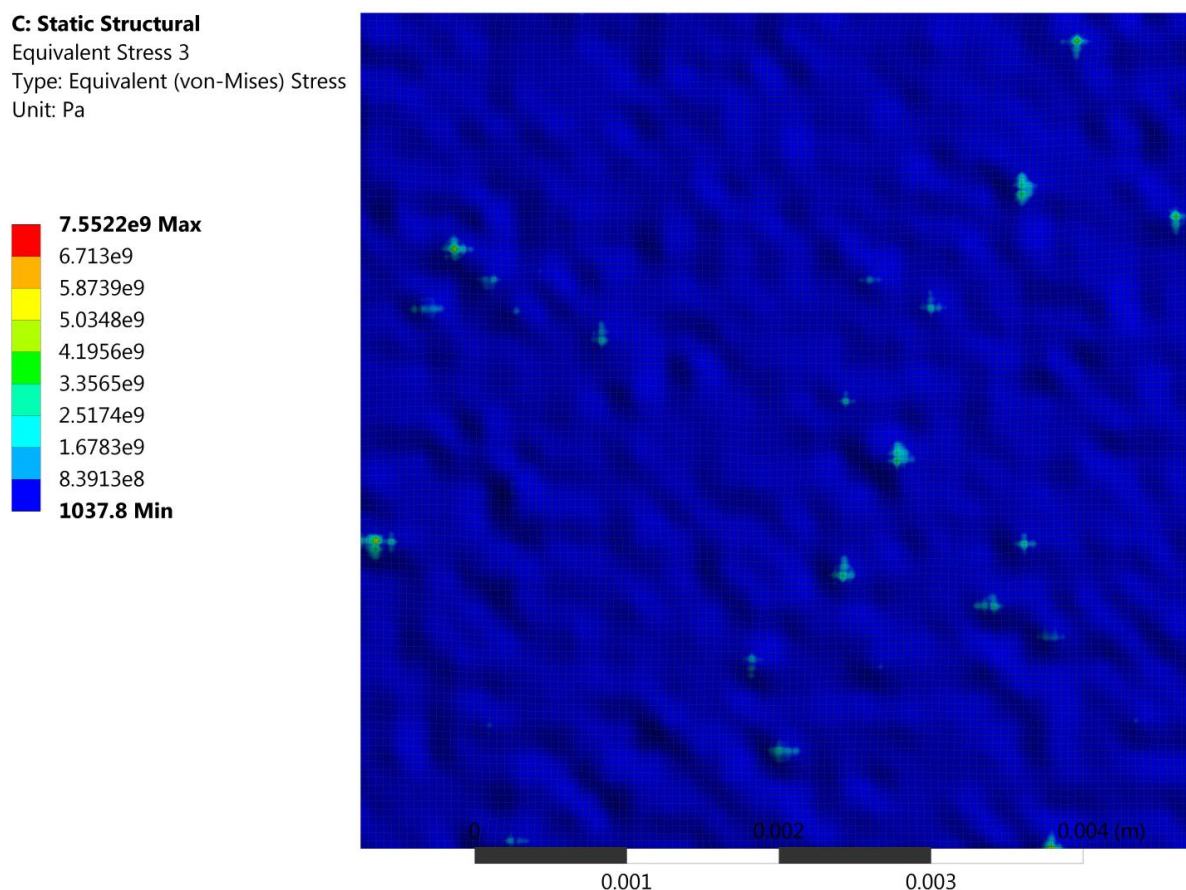


Рис. 6.41.- Поле эквивалентных напряжений на поверхности КМК-МС для приложенного давления 10^7 Па.

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 6.2.

Таблица 6.2.

Зависимость смещения от приложенного давления.

Пары материалов	КМК-МС 12X18H10T	КМК-МС ТВ-36	КМК-МС КМК-МС	12X18H10T 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	$1.08 \cdot 10^{-5}$	$1.17 \cdot 10^{-5}$	$1.46 \cdot 10^{-5}$	$3.92 \cdot 10^{-6}$

6.2.3. 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 рисунках 6.42 – 6.44 представлено распределение температурного поля контактирующих поверхностей.

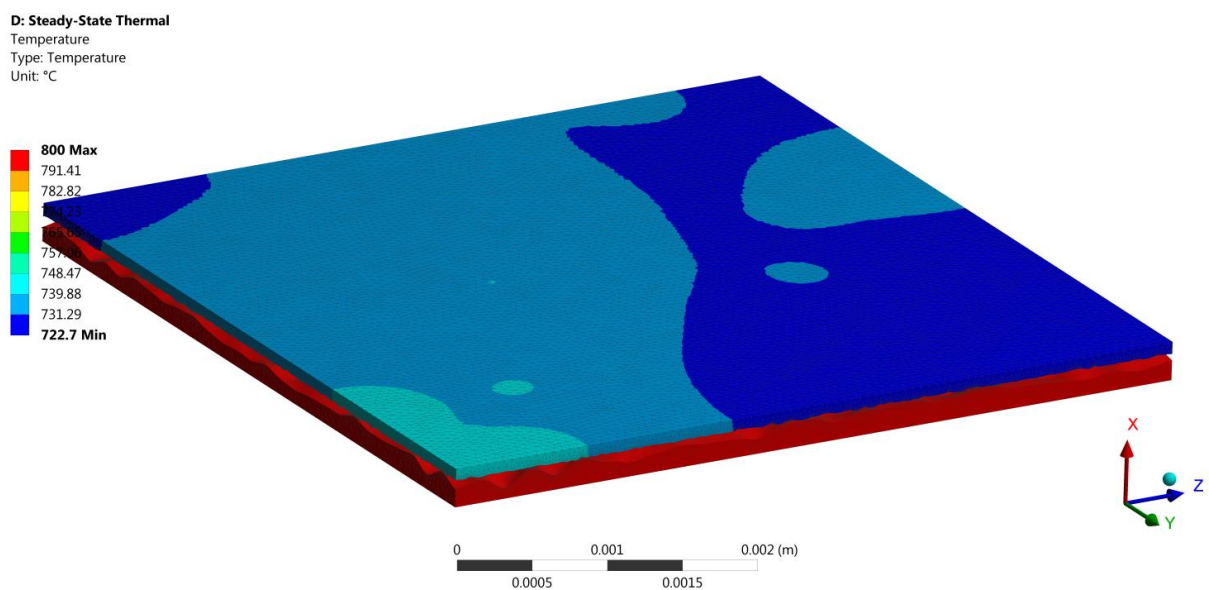


Рис. 6.42. – Распределение температурного поля в контактной паре КМК-МС – 12X10N8Т при межконтактном давлении $5 \cdot 10^6$ Па.

D: Steady-State Thermal
Temperature 2
Type: Temperature
Unit: °C

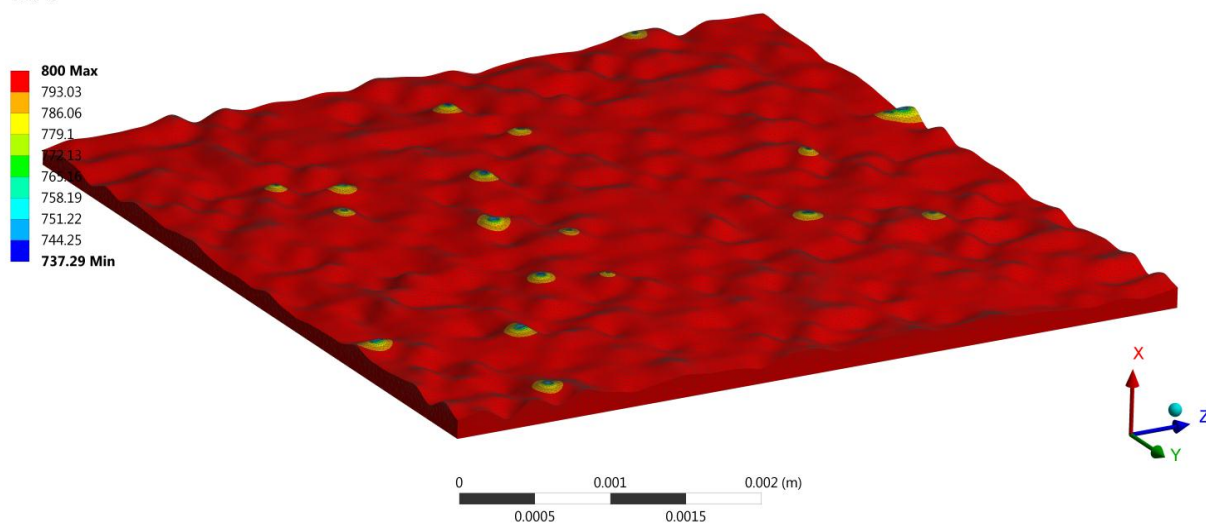


Рис. 6.43. – Распределение температурного поля на поверхности КМК-МС при межконтактном давлении $5 \cdot 10^6$ Па.

D: Steady-State Thermal
Temperature 3
Type: Temperature
Unit: °C

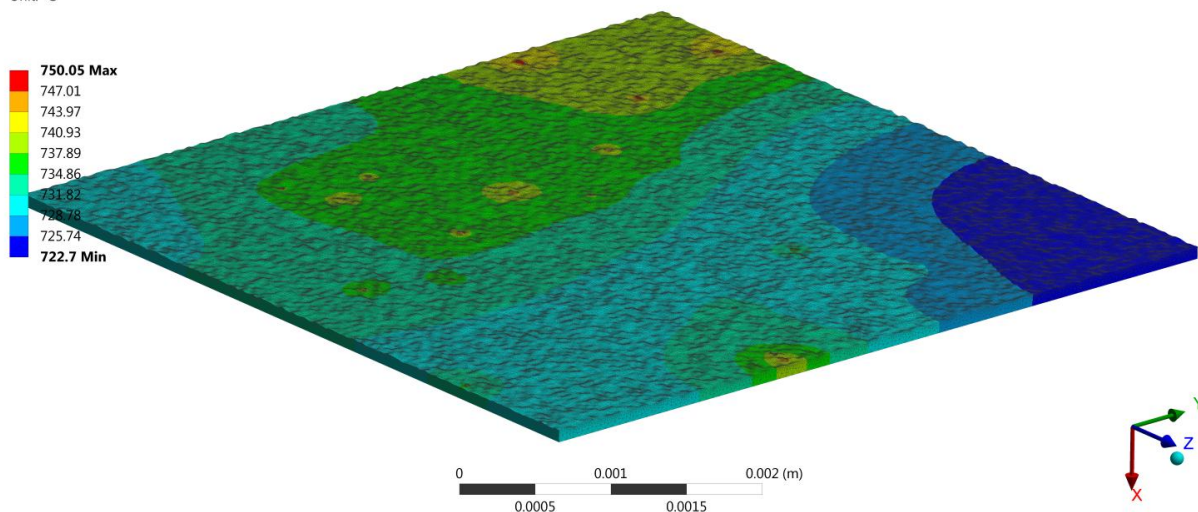


Рис. 6.44 – Распределение температурного поля на поверхности 12X18H10T при межконтактном давлении $5 \cdot 10^6$ Па.

Полученные значения температур в контактирующих поверхностях использовались для расчета КТС между соответствующими парами материалов. Значения температур для каждой контактной пары приведены в таблице 6.3:

Таблица 6.3.

Значения температуры в контактных парах

Пары материалов	КМК-МС - 12X18H10T		КМК-МС - ТВ-36		12X18H10T - ТВ-36		КМК-МС - КМК-МС	
	КМК-МС	12X18H10T	КМК-МС	ТВ-36	12X18H10T	ТВ-36	КМК-МС	КМК-МС
Давление, 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 рисунках 6.45 – 6.48.

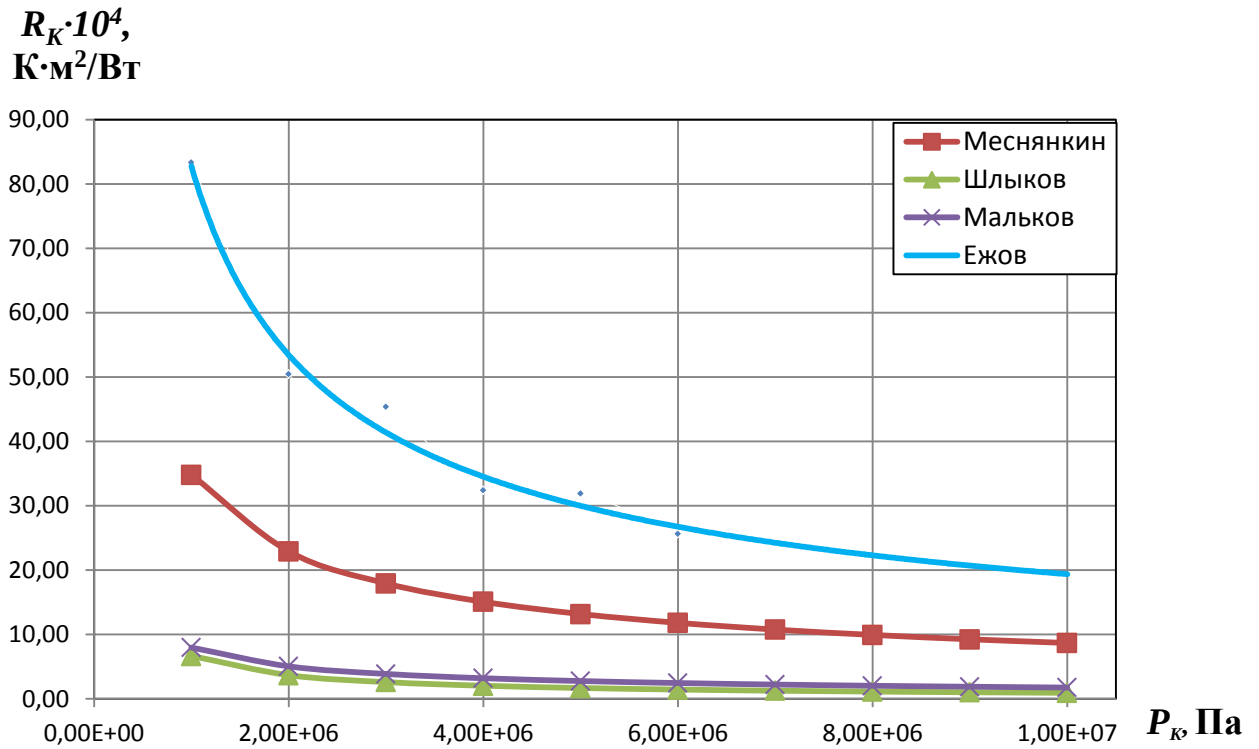


Рис. 6.45. – График зависимости R_K от P_K для контактной пары КМК-МС - 12X18H10T.

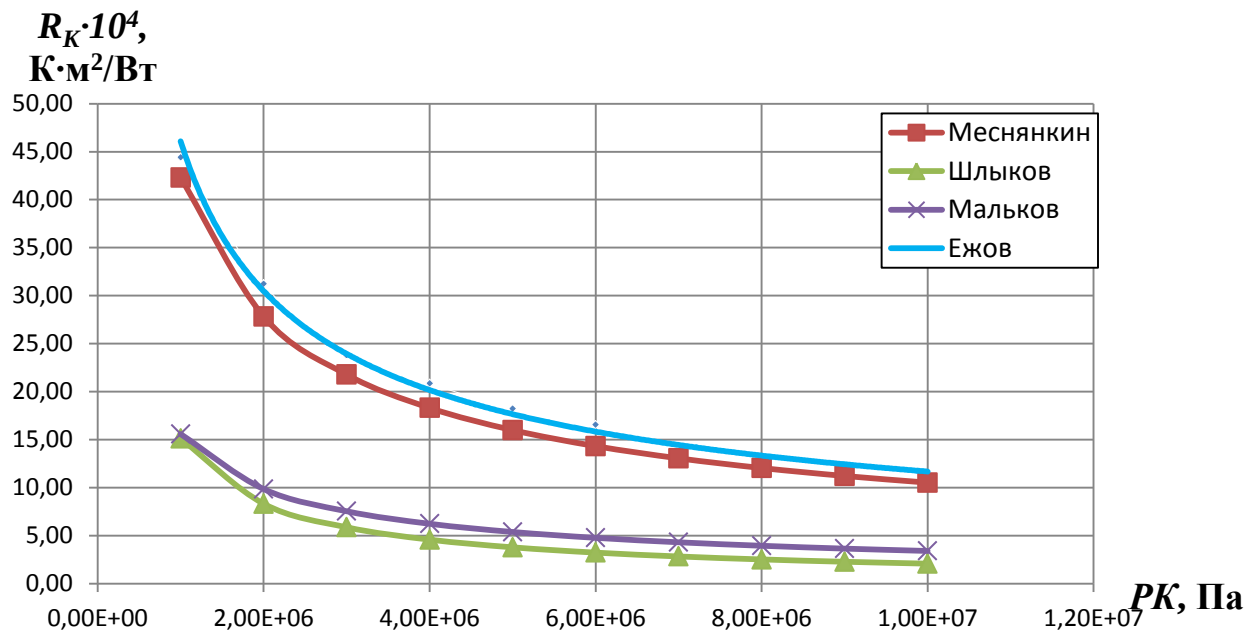


Рис. 6.46. – График зависимости R_K от P_K для контактной пары КМК-МС – ТВ-36.

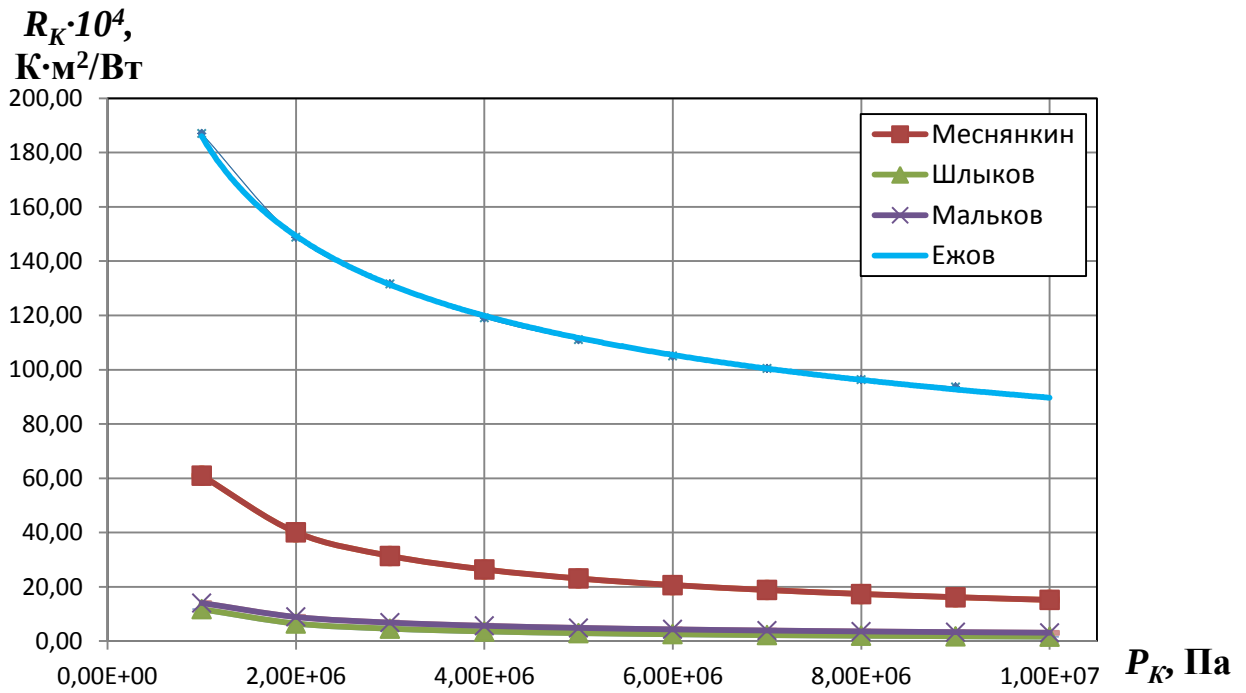


Рис. 6.47– График зависимости R_K от P_K для контактной пары КМК-МС – КМК-МС.

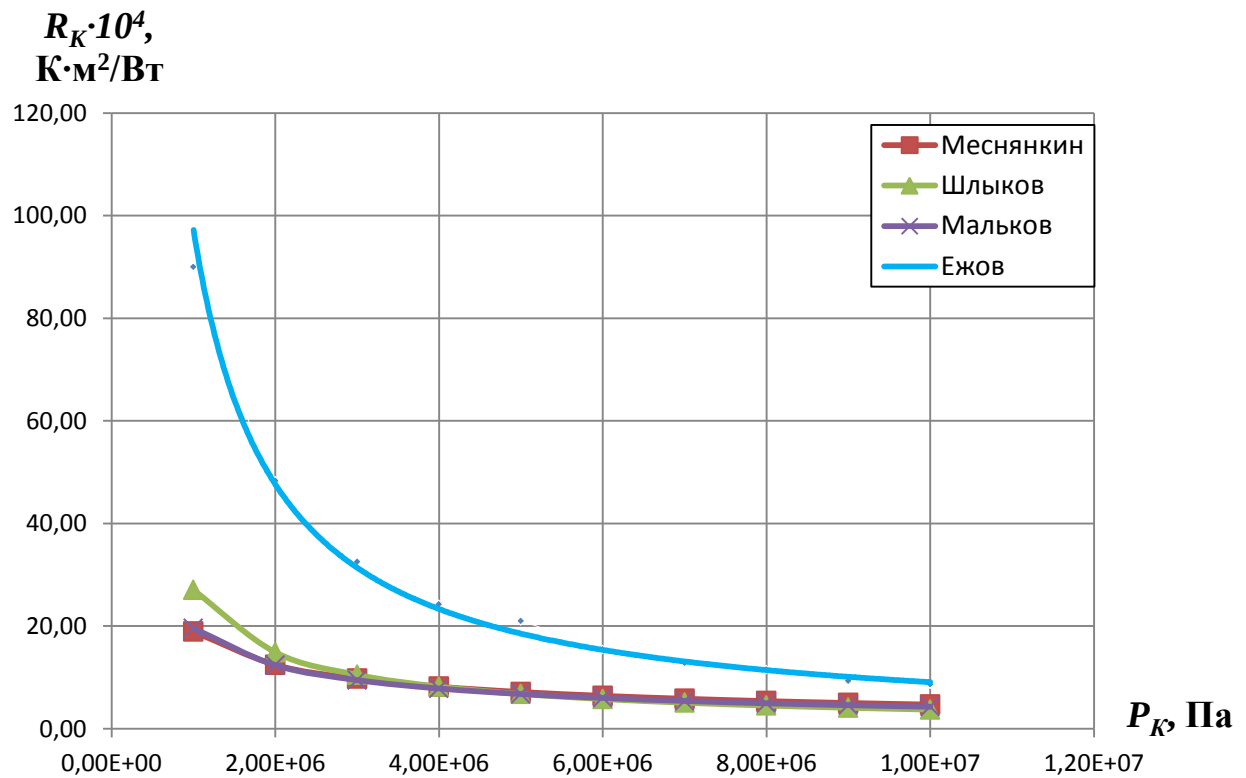


Рис. 6.48– График зависимости R_K от P_K для контактной пары ТВ-36 - 12X18Н10Т.

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 6.4. и на рисунке 6.49 приведены результаты расчета значений КТС рассматриваемых пар материалов для различных давлений.

Таблица 6.4.

Значения КТС пар материалов

Пары материалов	КМК-МС 12X18H10T	КМК-МС ТВ-36	КМК-МС КМК-МС	12X18H10T ТВ-36
Давление, Па	$R_K \cdot 10^4$, К·м ² /Вт	$R_K \cdot 10^4$, К·м ² /Вт	$R_K \cdot 10^4$, К·м ² /Вт	$R_K \cdot 10^4$, К·м ² /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

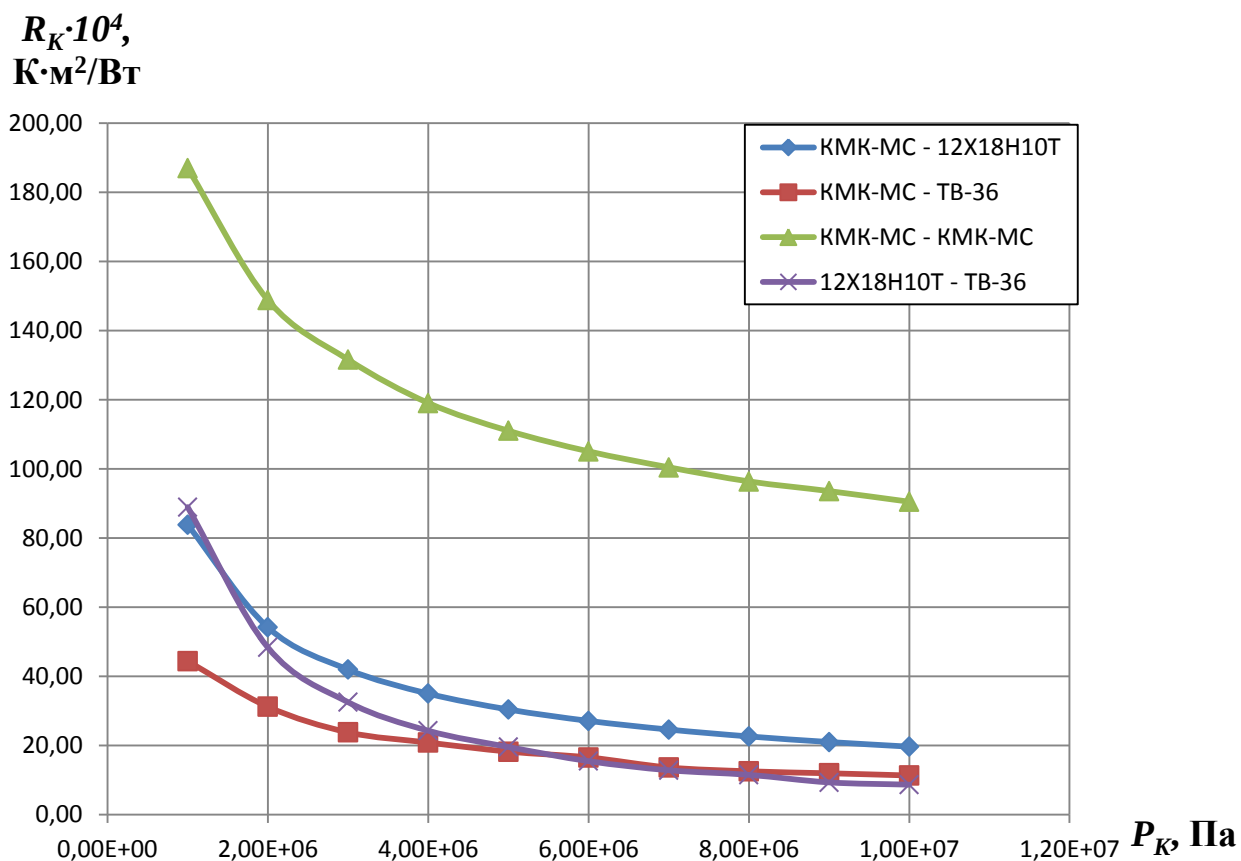


Рис. 6.49 – График зависимости КТС от давления для рассмотренных пар материалов.

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.

6.3. Расчет теплонапряженного состояния конструкции малой камеры сгорания с учетом значения КТС между соприкасающимися деталями

Опираясь на результаты проведенного предварительного расчета, (разделы 6.1, 6.2) 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 6.50 представлена сравнительная картина формирования температурных полей с учетом и без учета КТС.

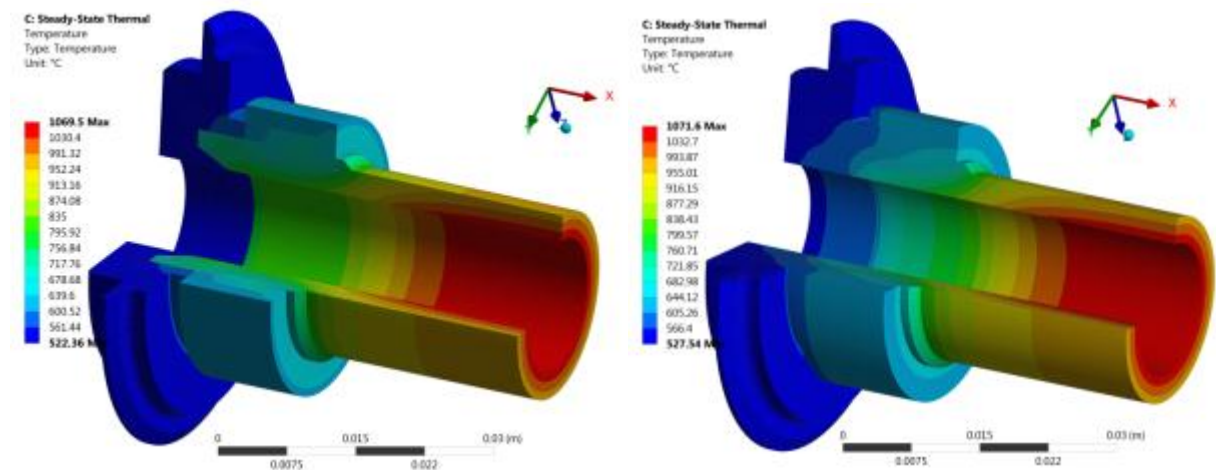


Рис.6.50 – Картина формирования температурных полей с учетом (слева) и без учета (справа) КТС.

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 рисунках 6.51 - 6.54.

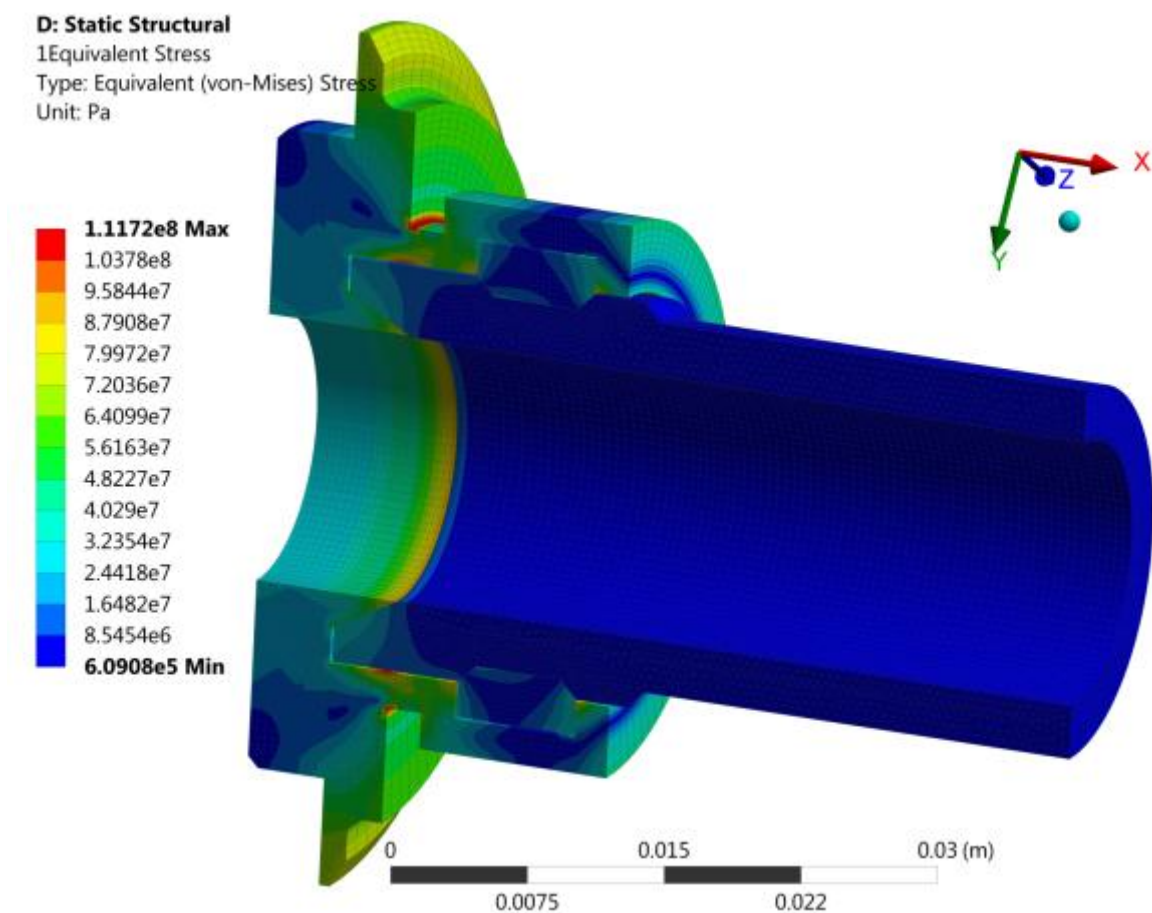


Рис.6.51 – Эквивалентные напряжения в конструкции с учетом R_K .

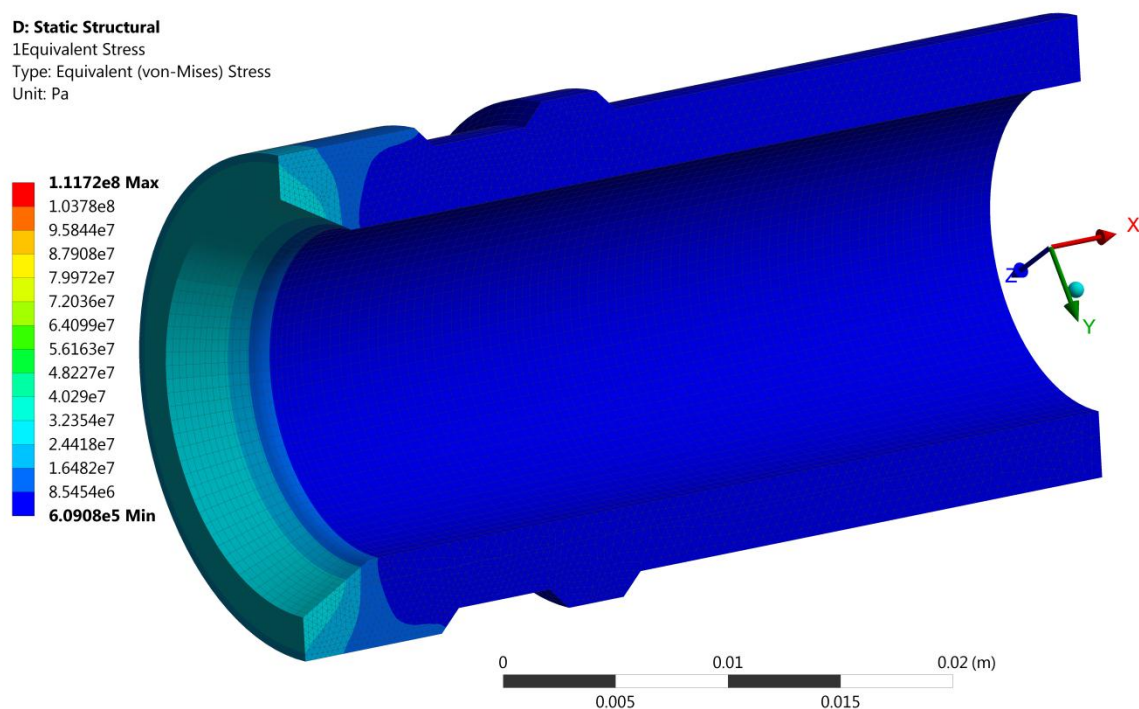


Рис. 6.52 – Поле эквивалентных напряжений камеры сгорания с учетом R_K .

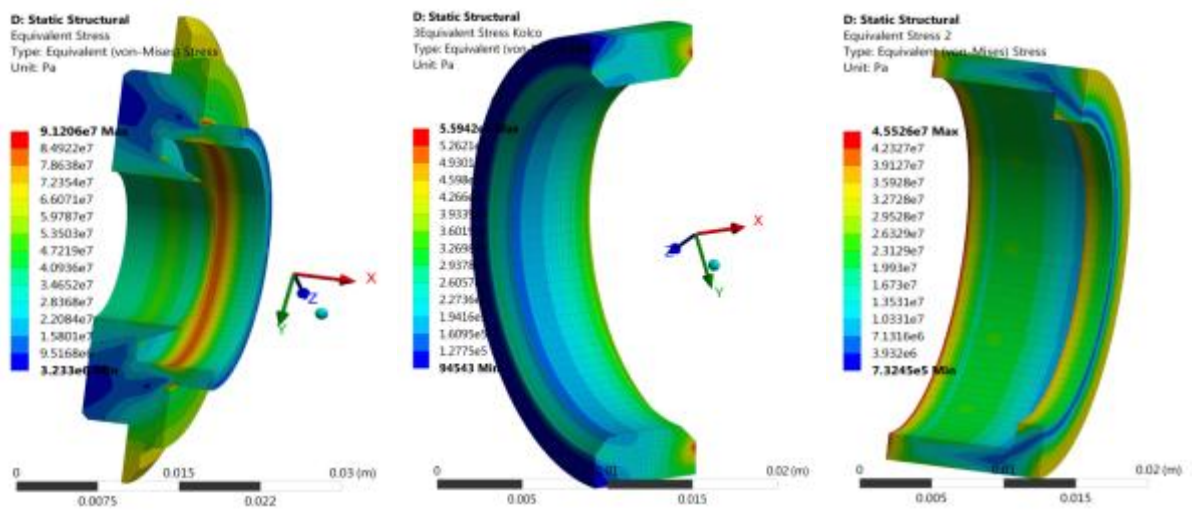


Рис. 6.53 – Поле эквивалентных напряжений прижимного и переходного колец с учетом R_K .

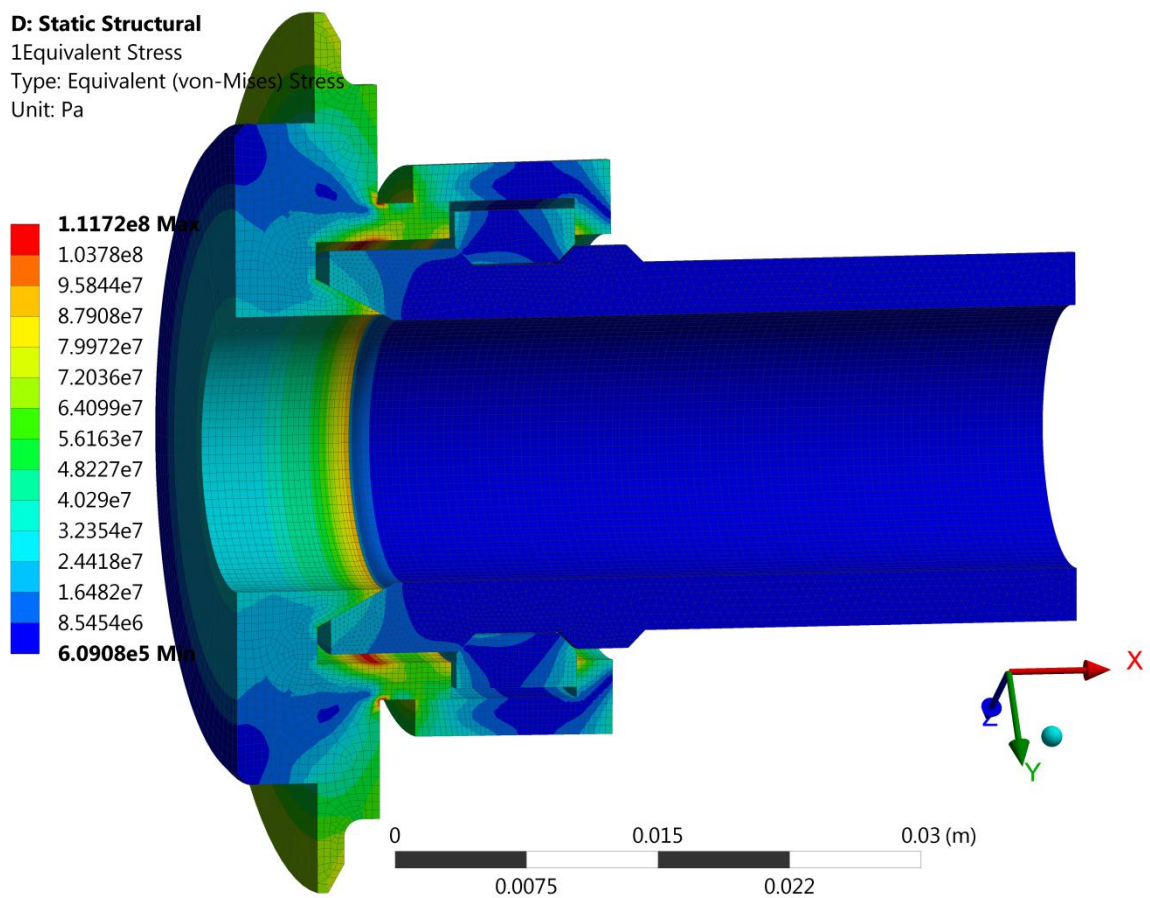


Рис.6.54– Поле эквивалентных напряжений конструкции (в масштабе перемещений 5:1) с учетом R_K .

Величины эквивалентных напряжений и давлений в зонах контактов в зависимости от величины угла α для сплавов ВТ-1, ВТ-5Л, ВТ-6Л, ВТ-9Л, ВТ-21Л, ВТ-3-1Л, ТВ-36, приведены на рисунках 6.55 – 6.58.

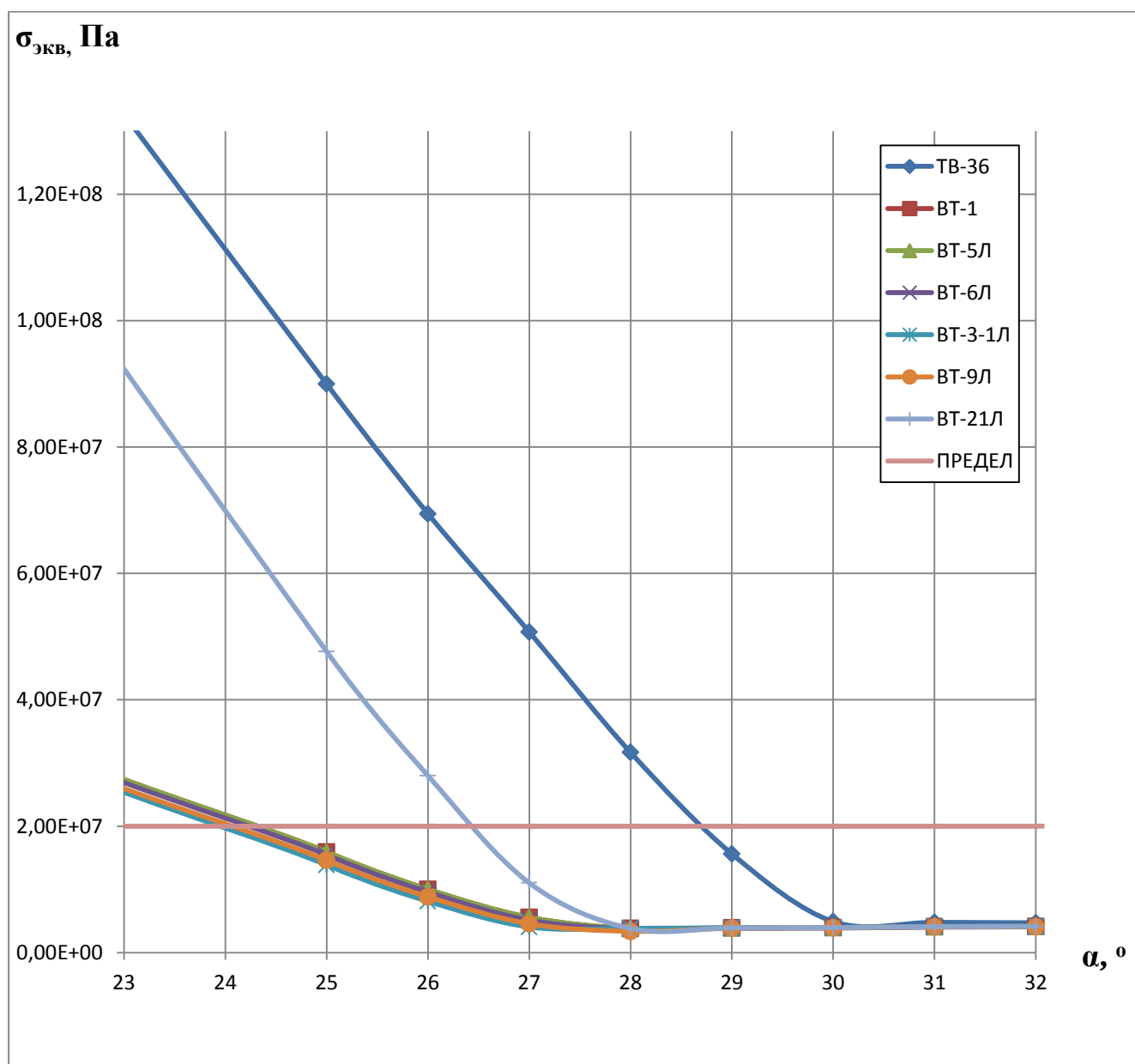


Рис.6.55. - График зависимости эквивалентных напряжений в композитной камере сгорания от угла сопряжения α с учетом R_K .

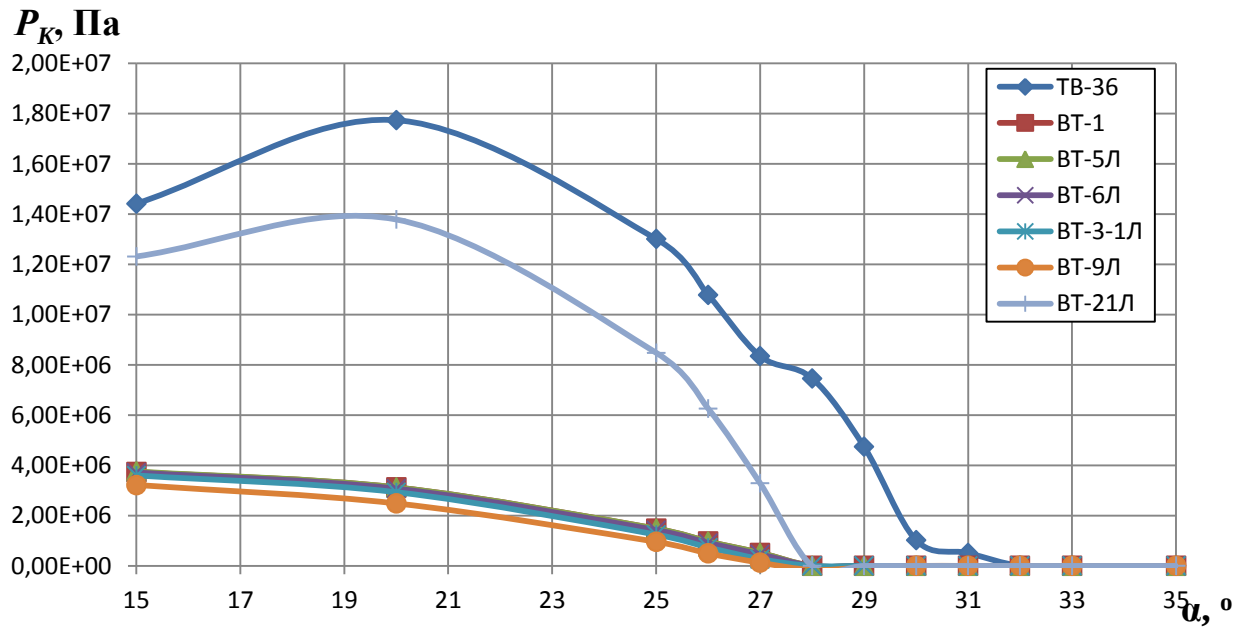


Рис.6.56. - График зависимости давлений P_K в зоне контакта 1 от угла сопряжения α с учетом R_K .

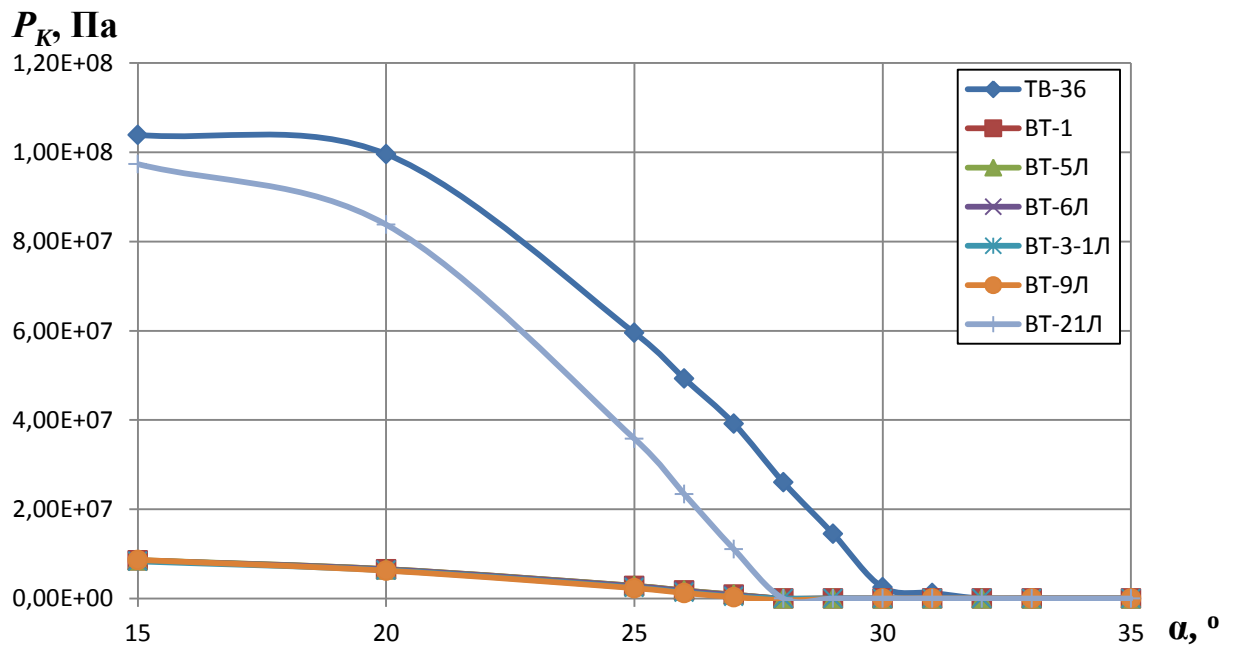


Рис.6.57. - График зависимости давлений P_K в зоне контакта 2 от угла сопряжения α с учетом R_K .

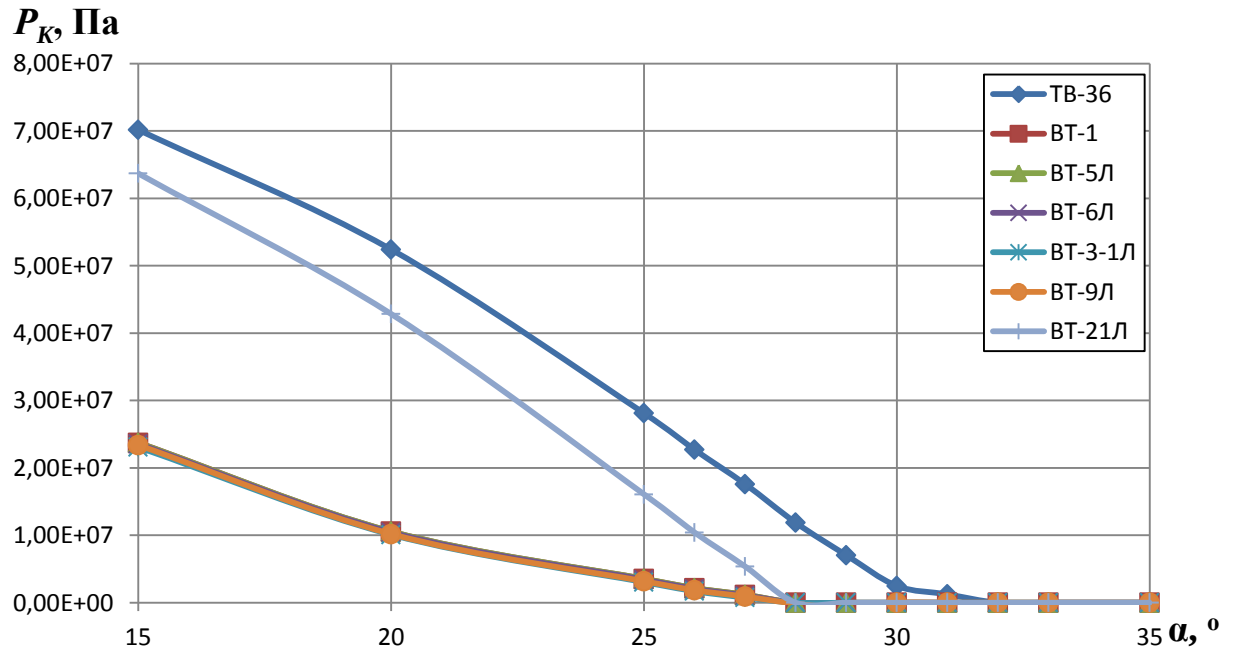


Рис.6.58. - График зависимости давлений P_K в зоне контакта 3 от угла сопряжения α с учетом R_K .

По результатам, представленным на рисунках 6.55 – 6.58 можно сделать вывод, что для рассматриваемой конструкции предпочтительные значения угла α лежат в диапазоне от 25° до 27° , а материалы можно выбрать из ВТ-1, ВТ-5Л, ВТ-6Л, ВТ-9Л, ВТ-3-1Л.

6.4.1 Камера сгорания с возможностью изменения материала прижимного кольца.

Исследуемым объектом для численного моделирования является конструкция жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРД МТ) с композитной (КМК-МС) камерой с возможностью изменения материала прижимного кольца. На рисунке 6.59 представлена рассматриваемая конструкция, которая состоит из двух частей: 1 – переходное кольцо из титанового сплава ТВ-36 с ТКЛР, равным $8 \cdot 10^{-6}$ 1/К, 2 – камера сгорания из композиционного материала КМК-МС со значением ТКЛР, равным $0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К..

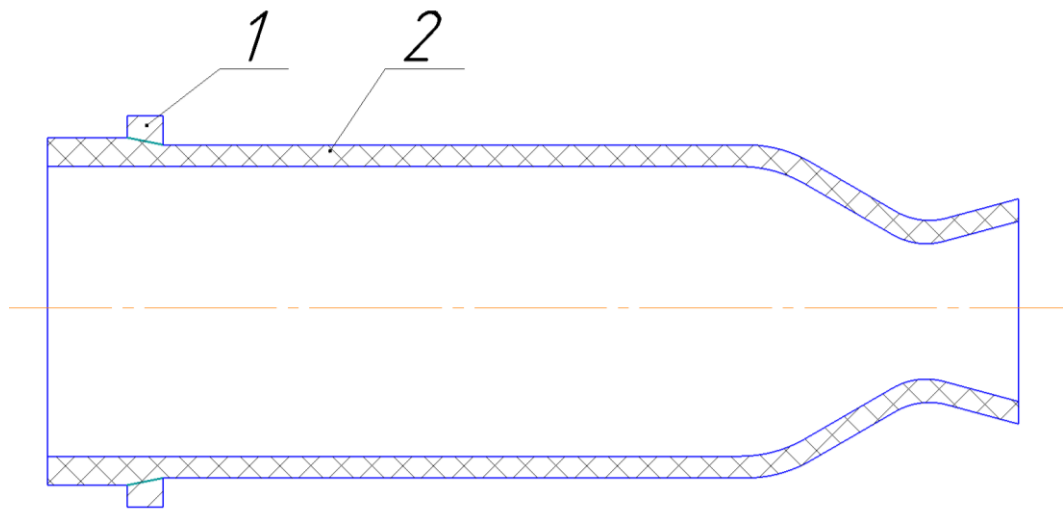


Рис.6.59 – Средняя камера сгорания из композиционного материала КМК-МС.

1 – переходное кольцо, 2 – камера сгорания.

Очевидно, что из-за существенного различия значений термического коэффициента линейного расширения используемых материалов при высоких температурах эксплуатации будет возникать значительная разница в тепловом расширении деталей, которая может привести к возникновению зазоров и деформаций между ними.

Как и в предыдущем расчете, произведенном в разделе 6.3. принято:

- для выполнения расчета можно использовать только часть камеры сгорания, находящуюся в окрестностях контакта,

- расчет выполняется для сектора с углом поворота 30° .

6.4.2 Сеточная модель расчета анализируемой конструкции

При создании сеточной модели особое внимание было уделено конформности сеточной модели в области контакта поверхностей деталей. Результат построения сеточной модели представлен на рисунке 6.60.

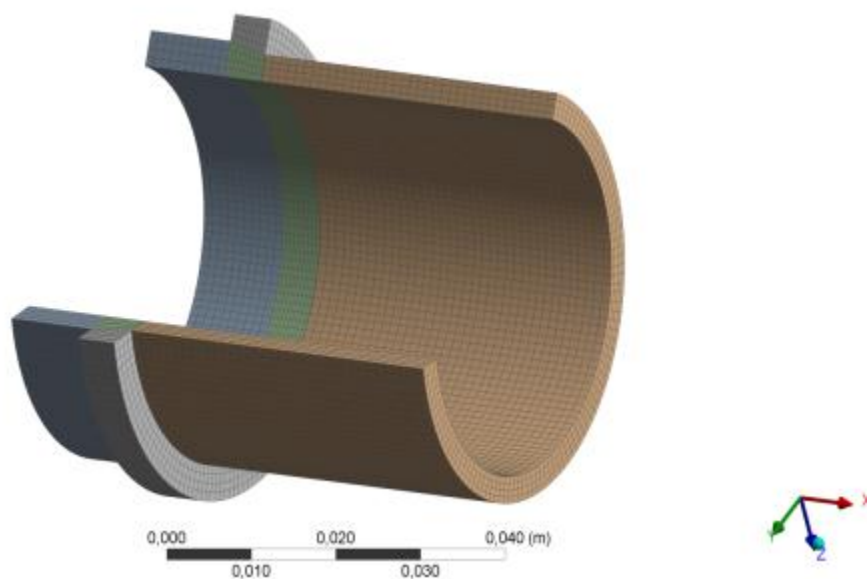


Рис.6.60 – Конечно-элементная модель для расчета.

Модели контактов между поверхностями были заданы исходя из условий сборки данного изделия. Задание модели контакта отображено на рисунке 6.61.

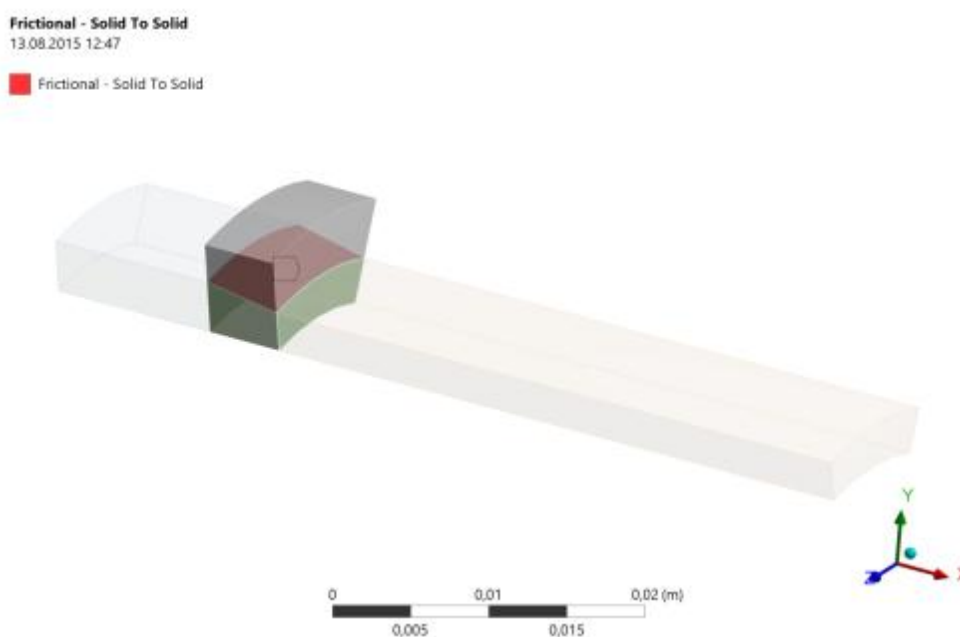


Рис. 6.61 – Задание моделей контактов.

Выбор коэффициента трения между соприкасающимися материалами взят из таблицы 6.1.

В качестве граничных условий для теплового расчета были указаны A - тепловой поток в стенку камеры сгорания $q = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$, B , C – излучение в окружающую среду с поверхности изделия. Степень черноты материалов принималась равной 0,8. (Рис.6.62)

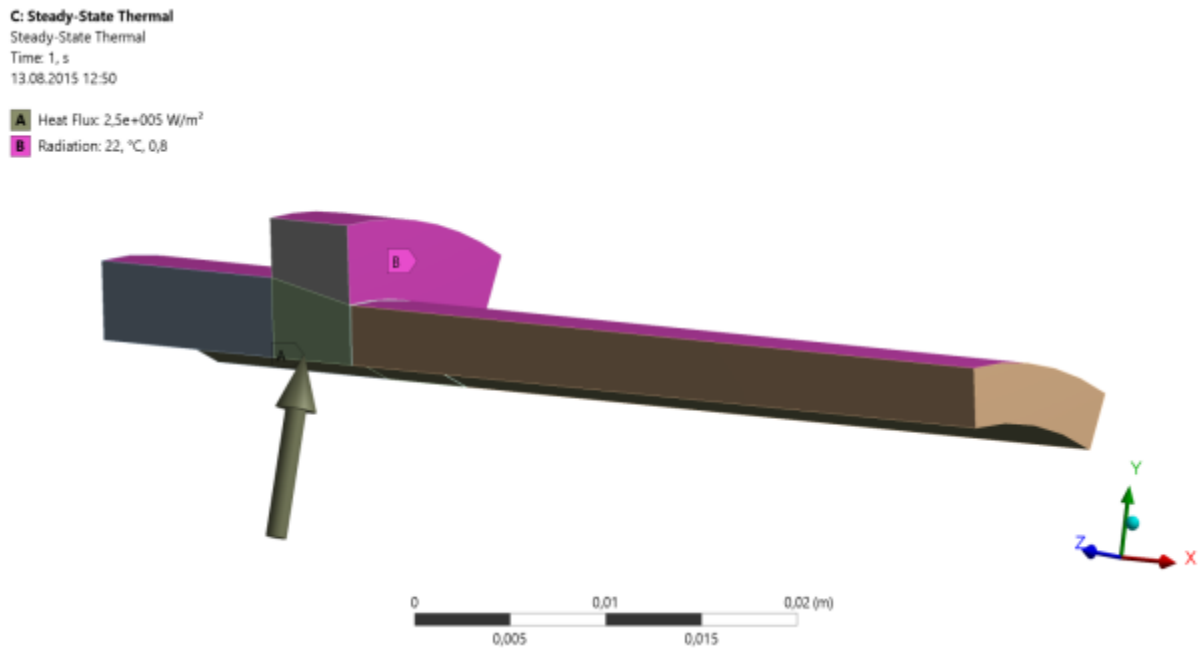


Рис.6.62 – Установка граничных условий.

6.4.3. Решение тепло-прочностной задачи

Параметры решения устанавливались на разбиение одного шага расчета на 10 подшагов, для контроля распределения температурного поля в зависимости от приложенного теплового потока. В результате проведения теплового расчета получено поле температур как всей конструкции в целом, так и отдельных её частей. (Рис.6.63 – 6.65)

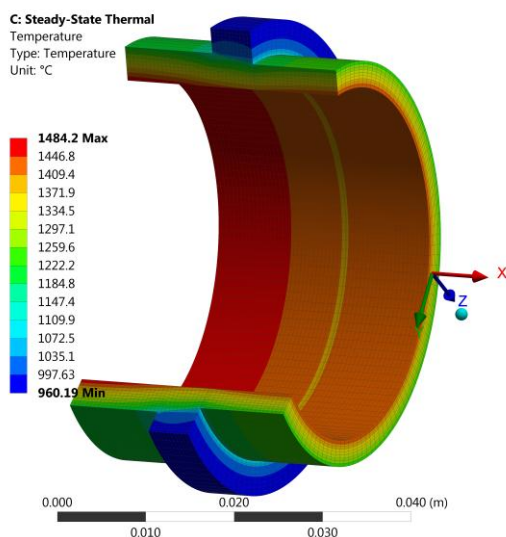


Рис.6.63 – Температурное поле конструкции.

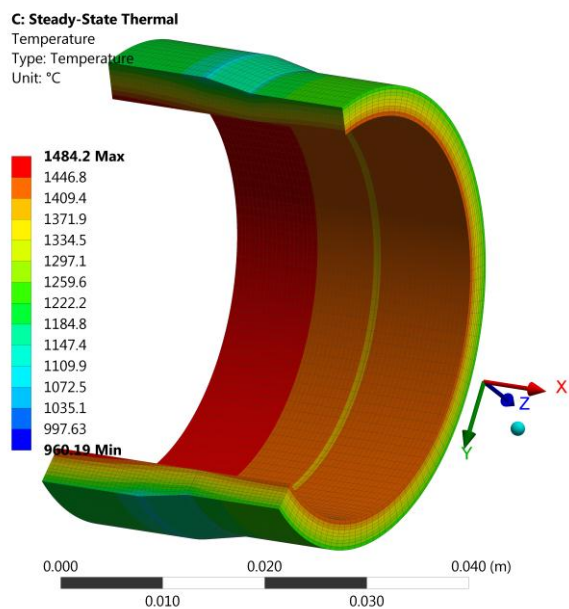


Рис.6.64 – Температурное поле
композиционной камеры сгорания.

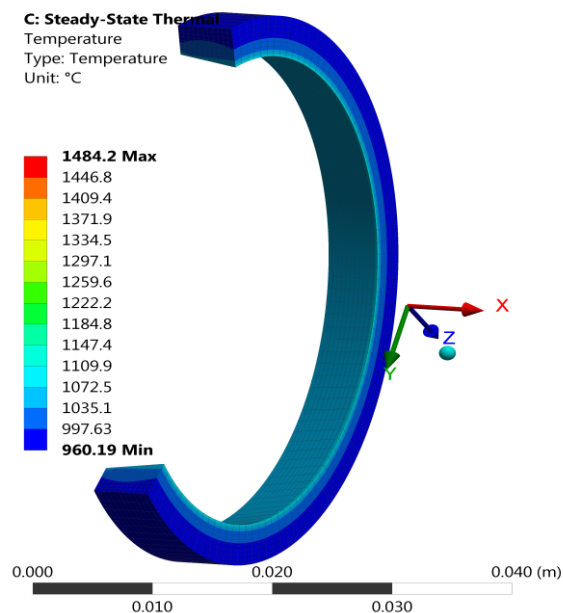


Рис.6.65 – Температурное поле
переходного кольца.

В качестве граничных условий для прочностного расчета использовалось температурное поле конструкции из теплового расчета. Результатом проведенного прочностного анализа стало поле эквивалентных напряжений, деформаций как всей конструкции в целом, так и ее составных деталей (Рис.6.65 – 6.67).

D: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

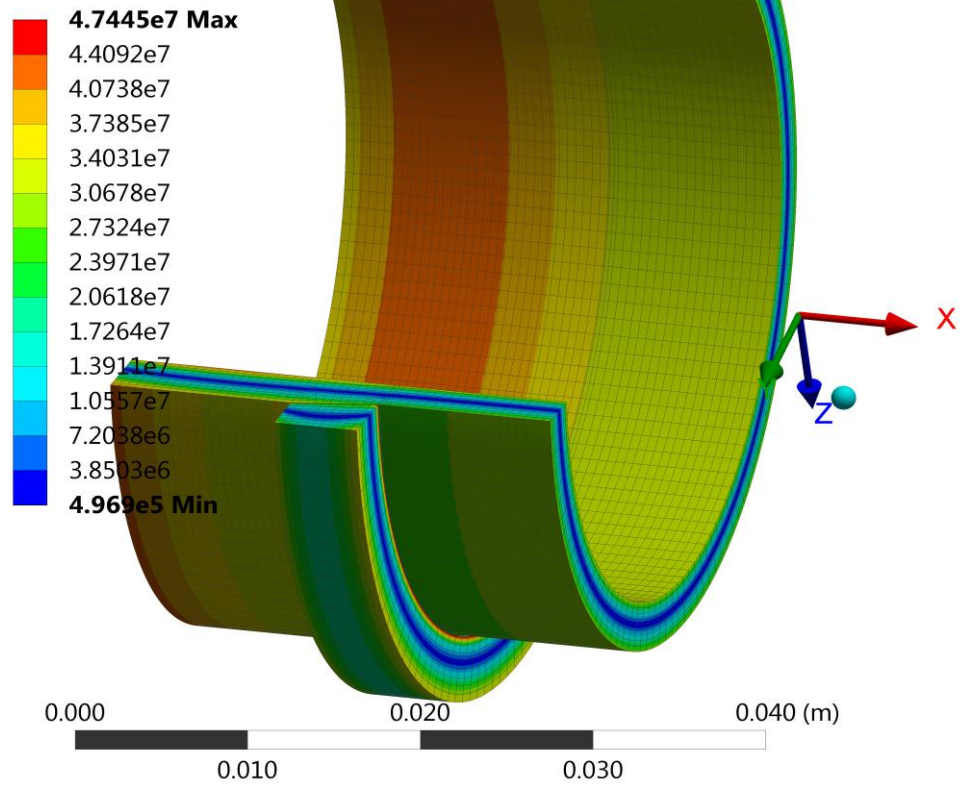


Рис.6.65 – Эквивалентные напряжения в конструкции.

D: Static Structural

Equivalent Stress 4

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

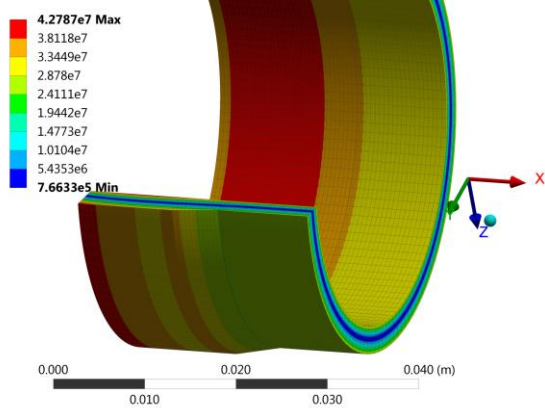


Рис. 6.66 – Поле эквивалентных напряжений камеры сгорания.

D: Static Structural

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

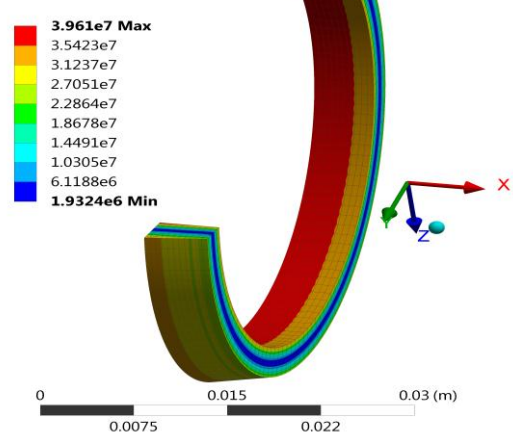


Рис.6.67 – Поле эквивалентных напряжений переходного кольца.

По техническим условиям эксплуатации для данной конструкции ЖРД МТ, изменение геометрических характеристик узла сопряжения не представляется возможным, соответственно, единственным решением проблемы доработки металлоперехода является выбор материала переходного кольца.

На основании проведенных ранее расчетов в качестве возможных вариантов используемых материалов могут быть рассмотрены:

- 1) ВТ-1, ВТ-5Л, ВТ-6Л, ВТ-9Л, ВТ-21Л, ВТ-3-1Л,
- 2) Титановый сплав с заданным ТКЛР ТВ-36,
- 3) КМК-МС – с расположением слоев вдоль оси камеры сгорания,
- 4) КМК-МС – с расположением слоев поперек оси камеры сгорания.

На этапе выбора материала произведен тепловой расчёт со всеми возможными вариантами материалов прижимного кольца. В расчетах принималось, что контакт не идеальный, и учитывается КТС. Графическое иллюстрация температурных полей представлено на рисунках 6.68 – 6.76.

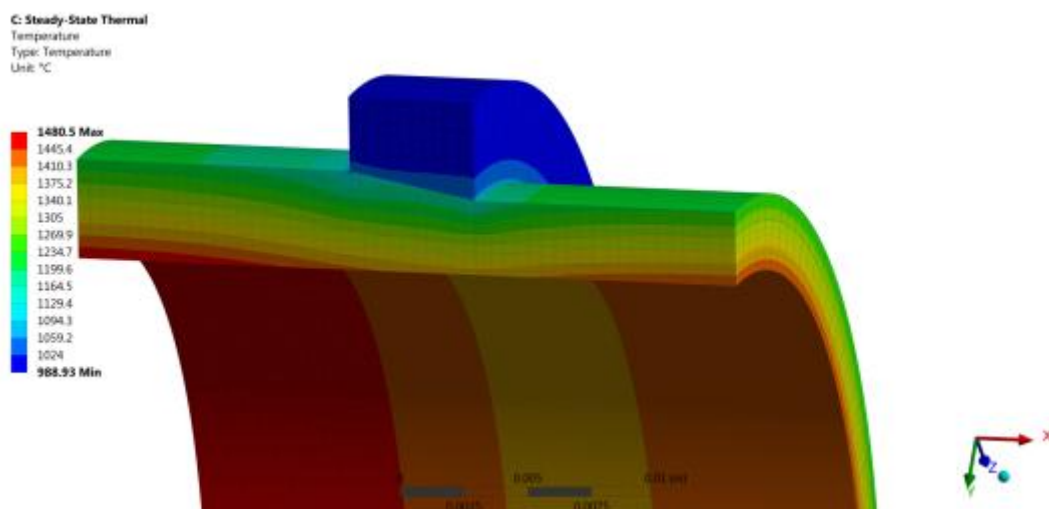


Рис.6.68 – Температурное поле конструкции с материалом кольца ВТ-1.

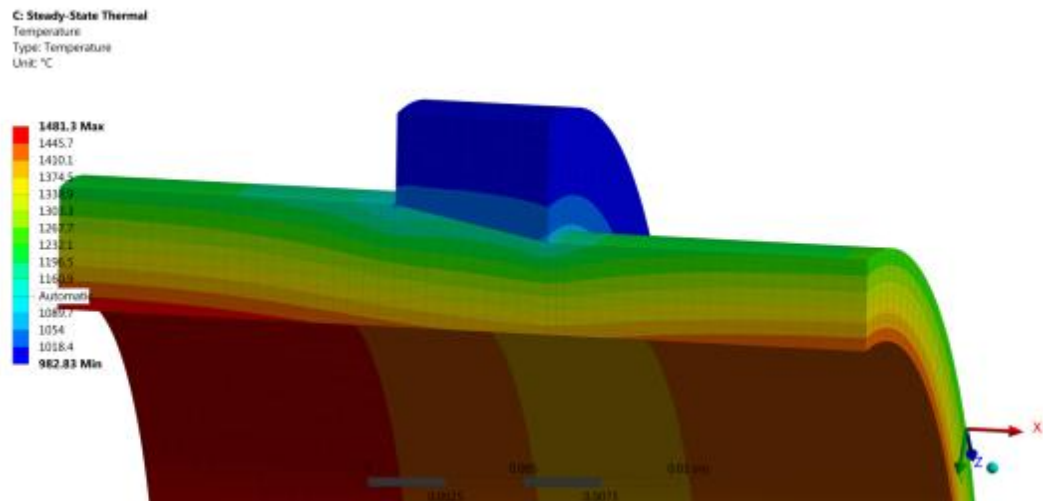


Рис.6.69 – Температурное поле конструкции с материалом кольца ВТ-5Л.

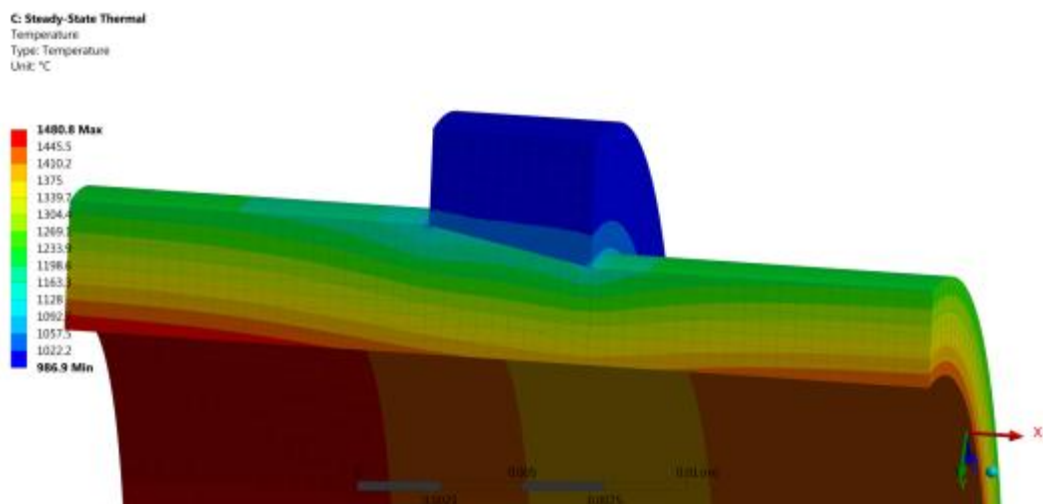


Рис.6.70 – Температурное поле конструкции с материалом кольца ВТ-6Л.

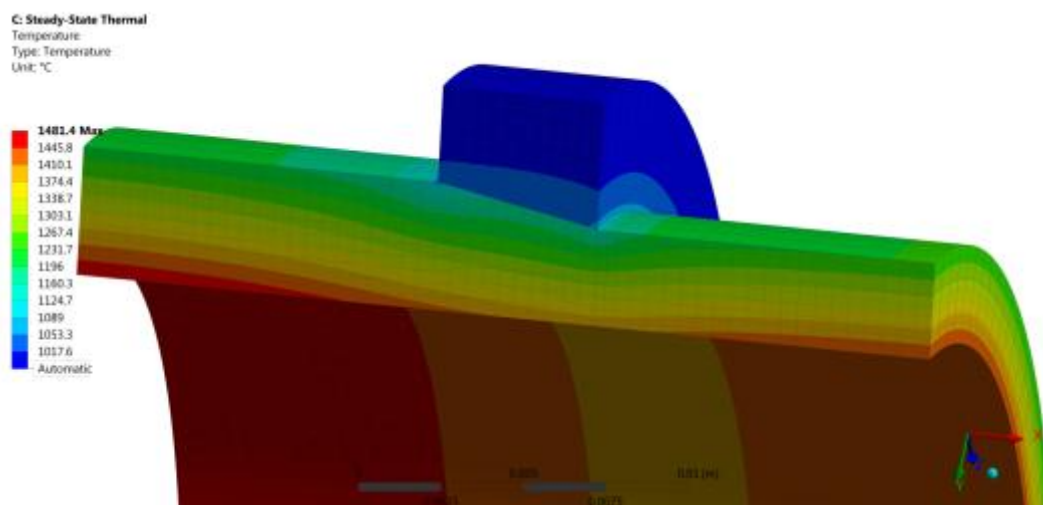


Рис.6.71 – Температурное поле конструкции с материалом кольца ВТ-9Л.

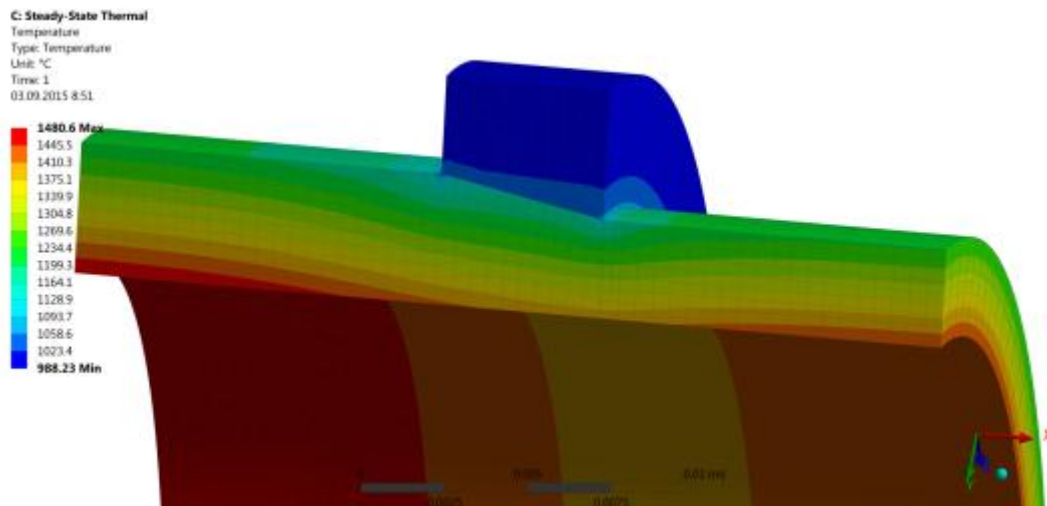


Рис.6.72 – Температурное поле конструкции с материалом кольца ВТ-21Л.

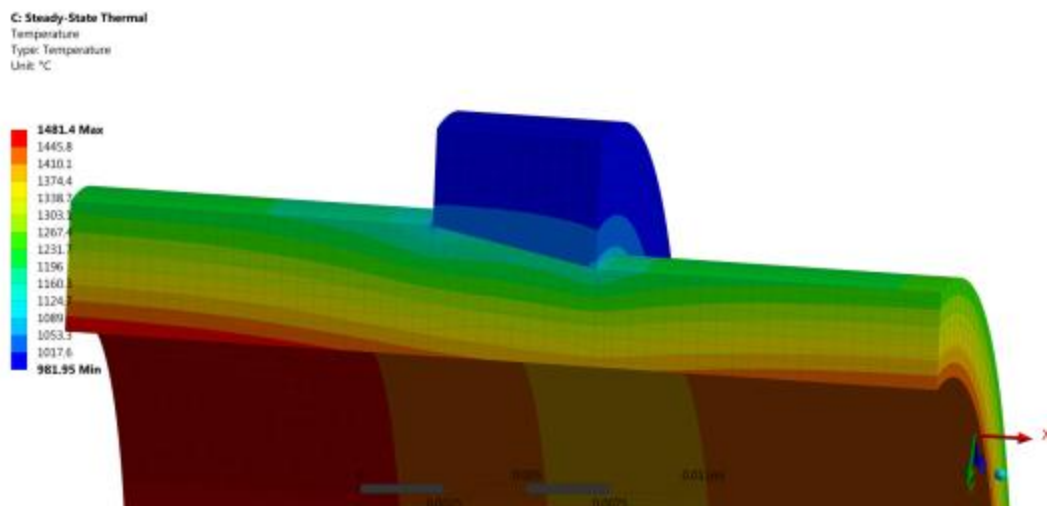


Рис.6.73 – Температурное поле конструкции с материалом кольца ВТ-3-1Л.

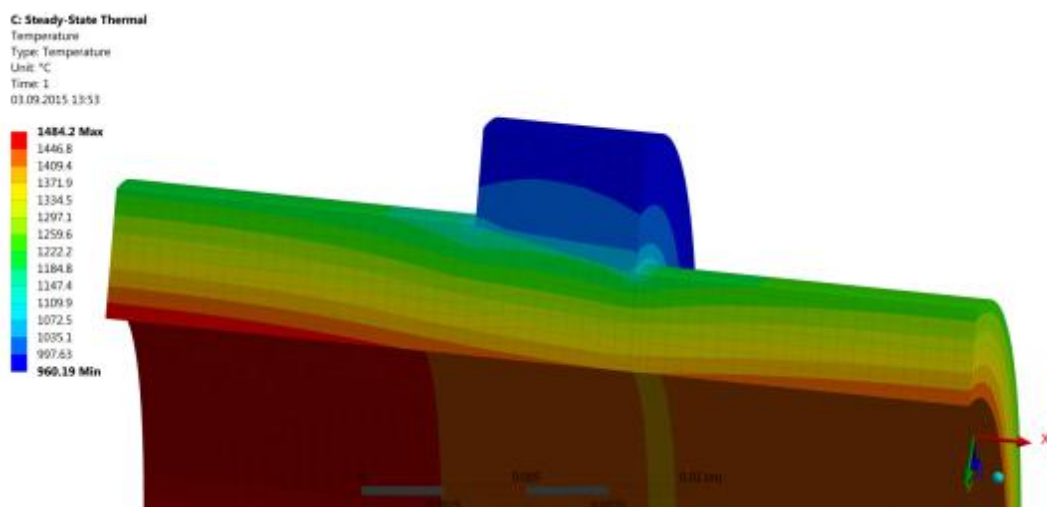


Рис.6.74 – Температурное поле конструкции с материалом кольца ТВ-36.

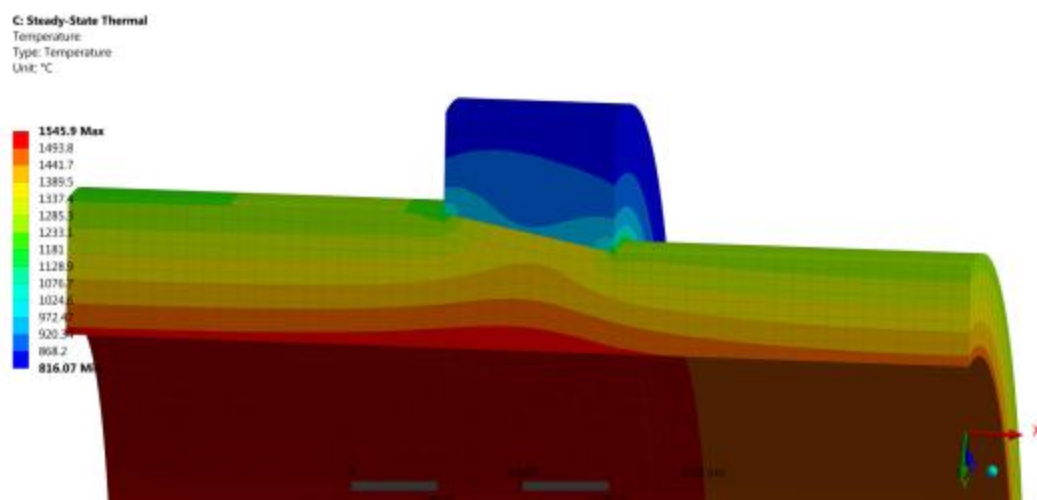


Рис.6.75 – Температурное поле конструкции с материалом кольца КМК-МС (волокна вдоль оси камеры).

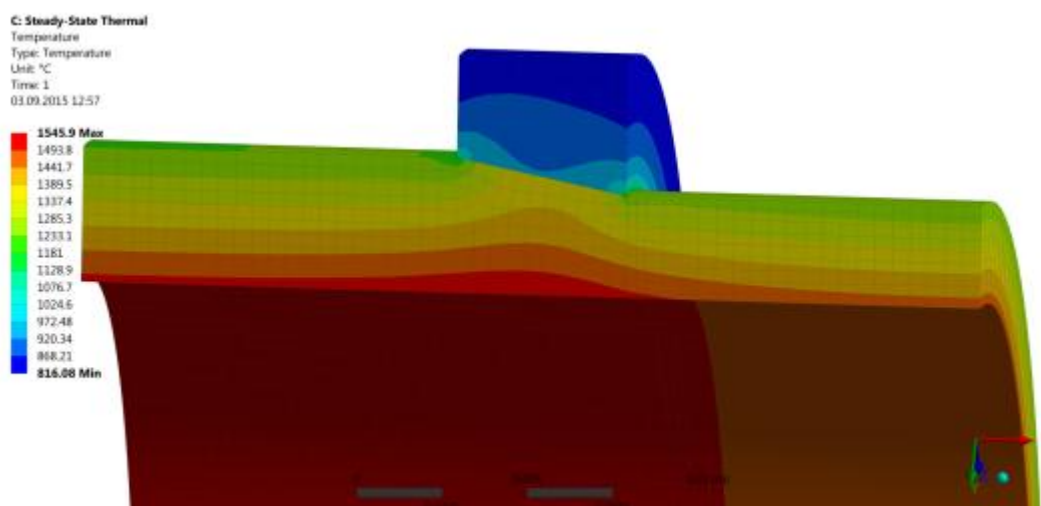


Рис.6.76 – Температурное поле конструкции с материалом кольца КМК-МС (волокна поперек оси камеры).

После определения теплового состояния конструкции произведен ее прочностной расчет. В результате прочностного расчета получены значения эквивалентных напряжений, как всей конструкции, так и ее деталей (рис.6.77 – 6.85).

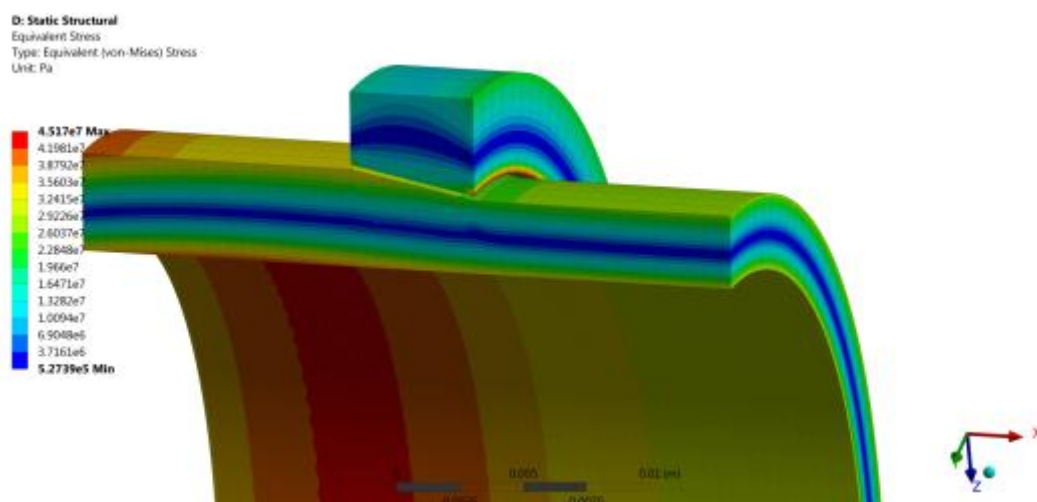


Рис.6.77 – Эквивалентные напряжения в конструкции с кольцом из ВТ-1.

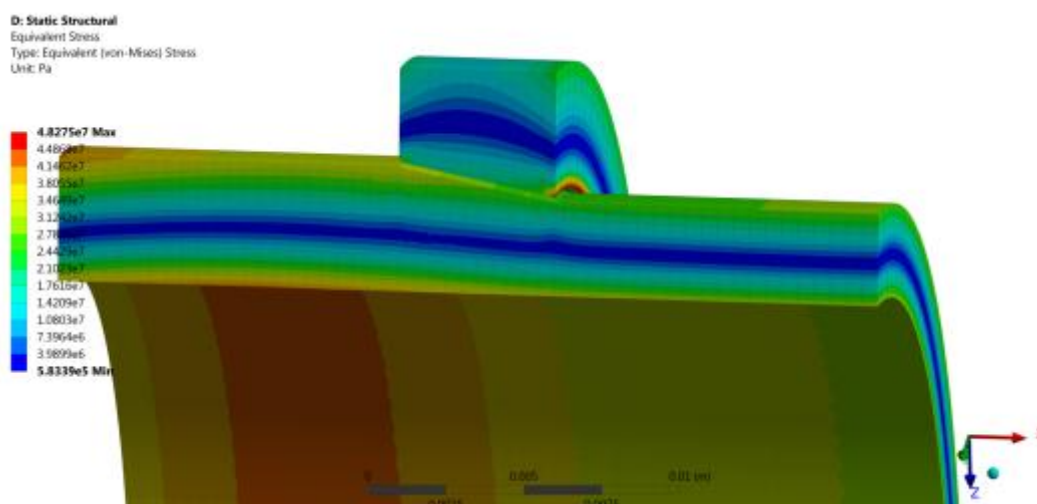


Рис.6.78 – Эквивалентные напряжения в конструкции с кольцом из ВТ-5Л.

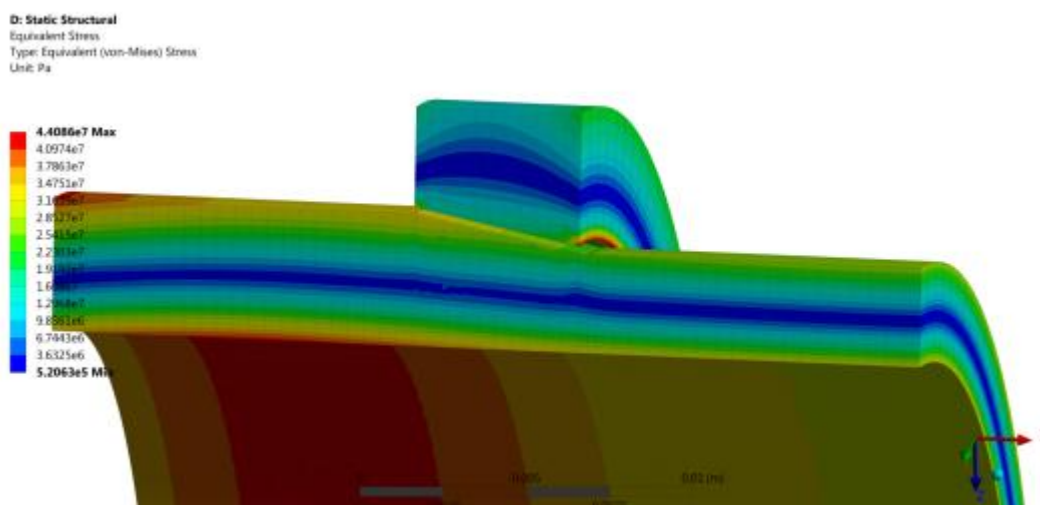


Рис.6.79 – Эквивалентные напряжения в конструкции с кольцом из ВТ-6Л.

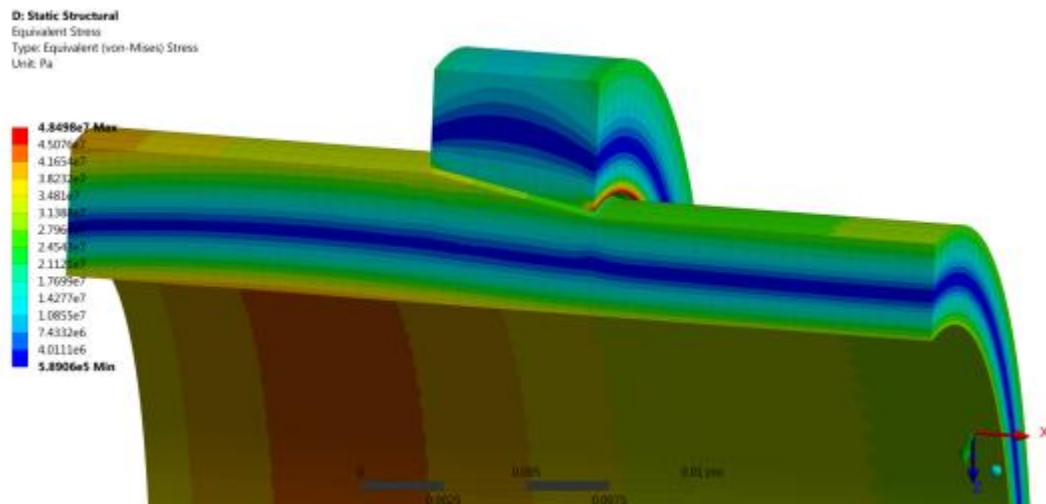


Рис.6.80 – Эквивалентные напряжения в конструкции с кольцом из ВТ-9Л.

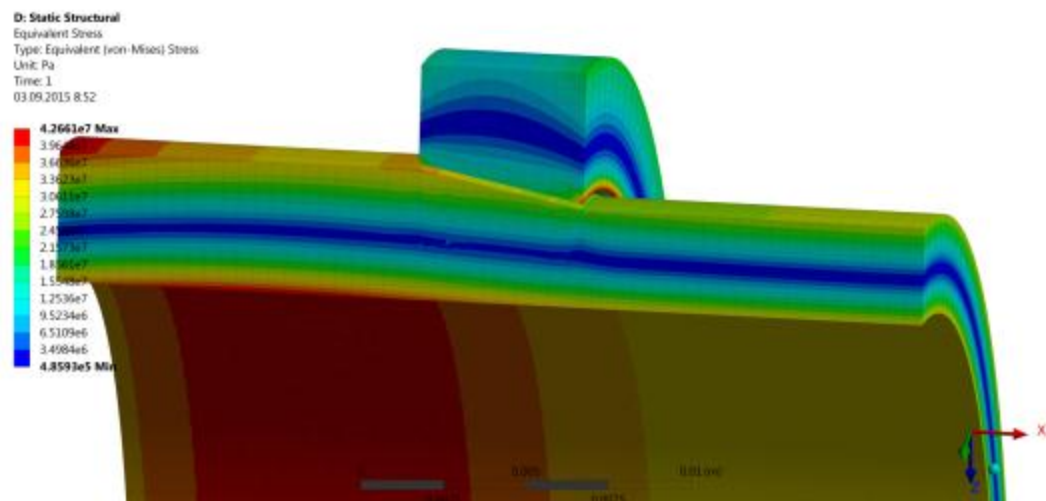


Рис.6.81– Эквивалентные напряжения в конструкции с кольцом из ВТ-21Л.

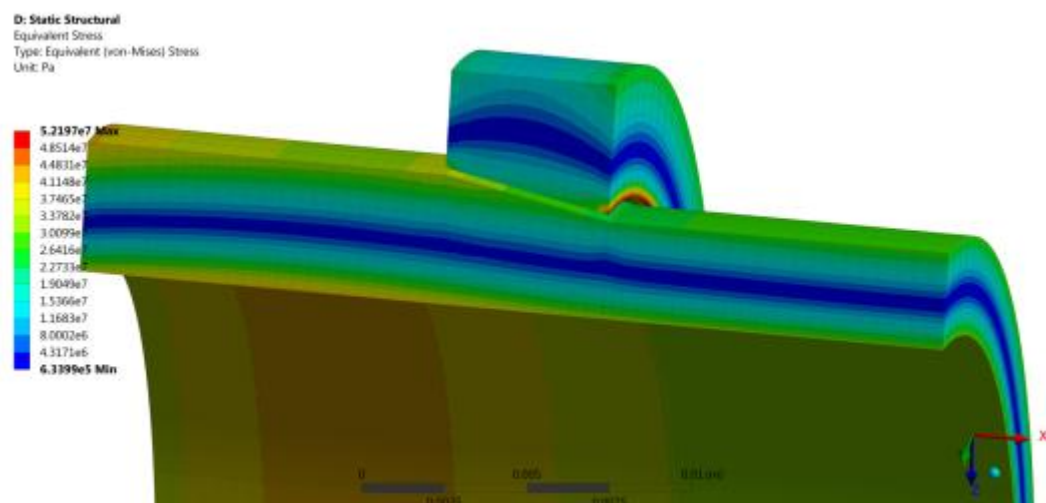


Рис.6.82 – Эквивалентные напряжения в конструкции с кольцом из ВТ-3-1Л.

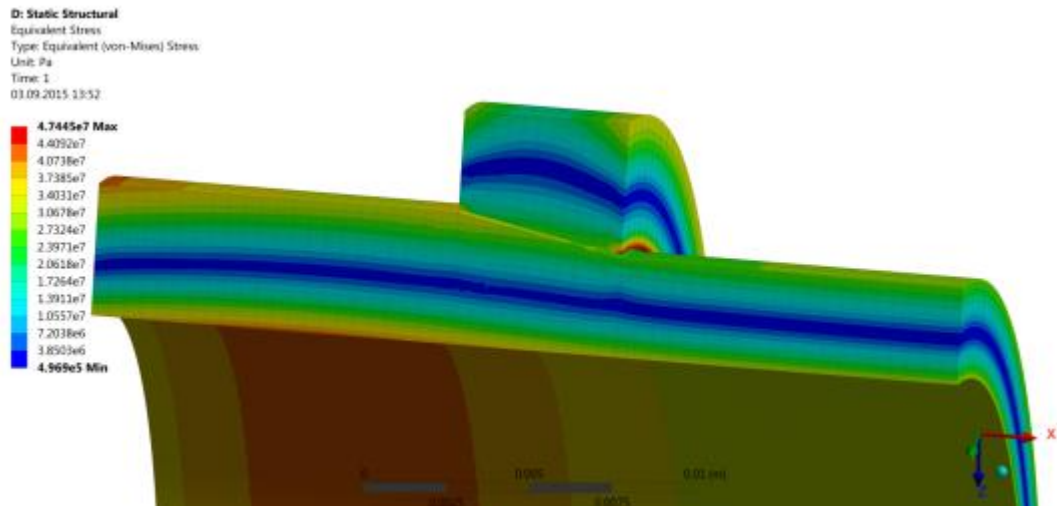


Рис.6.83 – Эквивалентные напряжения в конструкции с кольцом из ТВ-36.

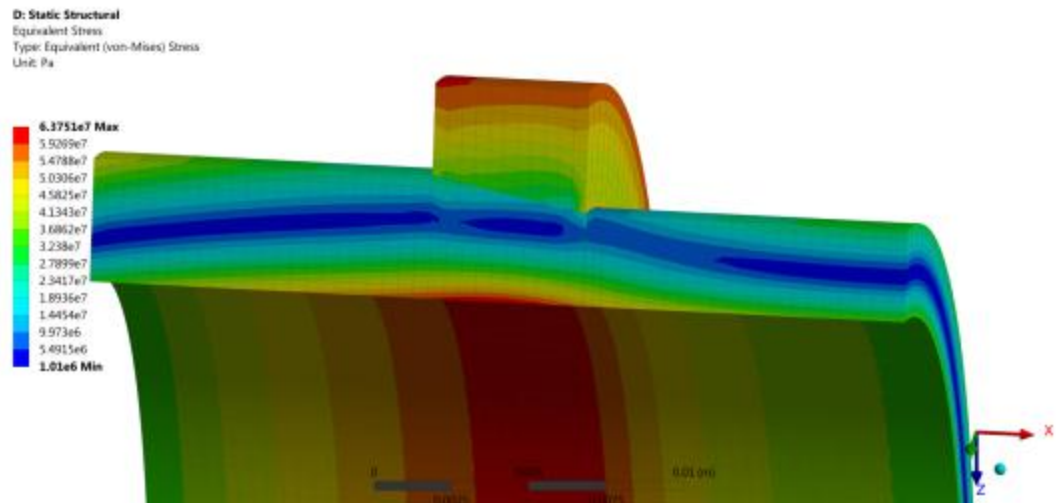


Рис.6.84 – Эквивалентные напряжения в конструкции с кольцом из КМК-МС (волокна расположены вдоль оси камеры).

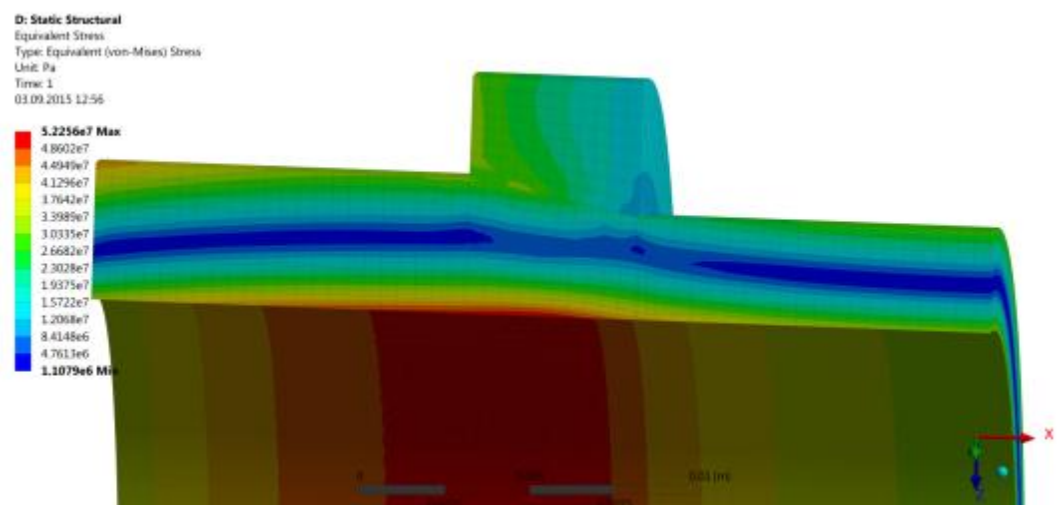


Рис.6.85 – Эквивалентные напряжения в конструкции с материалом кольца КМК-МС (волокна расположены поперек оси камеры).

Значение межконтактного давления и выполнение условия прижима в месте контакта представлено в таблице 6.5.

Таблица 6.5.

Величина межконтактного давления.

Материал кольца	Межконтактное давление, МПа	Условие контакта
BT-1	0	-
BT-5Л	0	-
BT-6Л	0	-
BT-9Л	0	-
BT-21Л	0	-
BT-3-1Л	0	-
ТВ-36 при температуре 250°C	46.1	+
ТВ-36 при температуре 960°C	0	-
КМК-МС слои вдоль оси	9.31	+
КМК-МС слои поперек оси	6.91	+

Результаты расчетов отчетливо показывают, что практически у всех титановых сплавов будет отсутствовать контакт при тепловой нагрузке. Прижимное кольцо выполненное из титанового сплава ТВ-36 в виду своего специфического ТКЛР на определённом этапе сжимает композитную камеру сгорания до 46 МПа, а потом теряет с ней контакт. При изготовлении прижимного кольца из материала КМК-МС таким образом, чтобы слои материала были ориентированы перпендикулярно к оси камеры сгорания, наблюдаются оптимальные значения контактного давления на всем периоде нагрева изделия.

6.5. Рекомендации по оптимизации теплонагруженных контактных соединений

В результате расчета были построены математические модели теплового и механического состояния жидкостных ракетных двигателей малой различных типоразмеров с камерами сгорания из композиционного материала. Проводилось исследование металлоперехода между самой камерой сгорания и элементами ее крепления, выполненными из металла. По результатам выполненных расчетов можно сформулировать следующие выводы:

- Ступенчатое соединение малого ЖРД МТ в области металлоперехода приводит к недопустимым нагрузкам на композиционный материал в месте контакта с переходной головкой, которые в результате разрушат конструкцию.
- Замена ступенчатого соединения на конусное позволяет обеспечить скольжение конических поверхностей деталей относительно друг друга, исключив, таким образом, недопустимые нагрузки.
- Для рассматриваемой конструкции ЖРД МТ с возможностью изменения геометрии соединений предпочтительные значения угла конусности сопрягаемых деталей α лежат в диапазоне от 25° до 27° , а предпочтительные материалы можно выбрать из ВТ-1, ВТ-5Л, ВТ-6Л, ВТ-9Л, ВТ-3-1Л.
- С использованием оптимизационного расчета определен диапазон углов конусной посадки с допустимыми значениями эквивалентных напряжений и межконтактных давлений.
- Использование модели шероховатости поверхности соприкасающихся деталей позволяет определить величину контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями.
- Введение в модель значений КТС позволяет уточнить картину температурного поля конструкции при нагреве, и на ее основе,

получить скорректированную картину формирования эквивалентных напряжений.

- Для ЖРД МТ с возможностью изменения материала прижимного кольца применение прижимных колец из титановых сплавов ведет к исчезновению контакта между прижимным кольцом и камерой сгорания.
- Наиболее предпочтительным материалом для изготовления прижимного кольца ЖРД МТ является композиционный материал КМК-МС с ориентацией слоев перпендикулярно оси камеры сгорания.

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Рассмотрены и проанализированы типовые конструкции жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Установлено, что при их создании применяются принципиально новые материалы, которые из-за особенностей разрабатываемых конструкций должны быть выполнены разъемными, что приводит к необходимости учета контактного термического сопротивления, возникающего за счет неидеальности соединения.

2. По результатам обзора литературы выявлено, что известные публикации в области исследования контактного термического сопротивления и моделирования микрогеометрии соприкасаемых поверхностей свидетельствуют об актуальности тематики, её незавершённости и в явном виде невозможности использования имеющихся публикаций при проектировании современных двигателей.

3. Проведен анализ современных методов моделирования поверхности микрогеометрии сопрягаемых деталей и предложена методика построения трехмерной шероховатости поверхности, базирующейся на данных полученных с электронного профилометра. По результатам этой методики разработан метод определения контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями разнородных материалов с возможностью учета наличия наполнителя в зоне контакта, позволяющий провести предварительный расчет теплонапряженного состояния контактной пары.

4. Проведен расчет термомеханического состояния конструкции жидкостного ракетного двигателя малой тяги с возможностью с возможностью изменения материала прижимного кольца. Предложен вариант усовершенствования геометрии с изменением узла сопряжения камеры сгорания и переходной головки.

5. Проведен расчет теплового и напряженно-деформированного состояния конструкции жидкостного ракетного двигателя малой тяги с возможностью конструктивного изменения геометрии соединений. Рассмотрены использование в качестве материалов прижимного кольца различные титановые сплавы и композиционные материалы. Установлено, что применение прижимных колец из титановых сплавов ведет к исчезновению контакта между прижимным кольцом и камерой сгорания, а наиболее предпочтительным материалом прижимного кольца жидкостного ракетного двигателя малой тяги является композиционный материал КМК-МС с ориентацией слоев перпендикулярно оси камеры сгорания.

6. С целью проверки предложенных методик разработана экспериментальная установка для определения контактного термического сопротивления, оснащенная современной аппаратной платформой, электронными датчиками преобразования термопар и прикладываемого давления. Проведены серии экспериментов между различными парами контактирующих материалов.

7. Выполнено сопоставление величин контактного термического сопротивления, их корреляция с результатами экспериментов и данными рассчитанными по известным методикам позволяют рекомендовать разработанную методику для инженерных расчетов.

8. Результаты проведенных исследований с большой определенностью и точностью позволяют на начальном этапе проектирования учесть основные проблемные зоны, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и, в итоге, внести коррективы в конструкцию, что позволит сократить сроки испытаний и отработки изделия и создать более надежную конструкцию.

Одним из важных моментов предложенной методики является моделирование трехмерной модели шероховатой поверхности, максимально точно повторяющей характер профилограммы снятой электронным профилографом. Данная модель легла в основу контактного теплового и прочностного анализа, что в конечном итоге позволило сформировать целостную картину прогнозирования КТС в реальных соединениях.

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

μ - коэффициент Пуассона

τ_{max} - максимальное касательное напряжение

γ_{max} - максимальная деформация

ε_t – температурные деформации

α - коэффициент теплового расширения тела

T - температура в узле

T_{ref} - исходная температура тела

R_a - среднеарифметическое отклонение профиля

R_z - высота неровностей

R_{max} - наибольшая высота неровностей профиля

S_m — средний шаг неровностей профиля

S — средний шаг неровностей по вершинам

t_p — относительная опорная длина профиля

$h_{\text{ср}}$ – 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

$\lambda_{м_{экв}}$ – эквивалентная теплопроводность

P_K – контактное давление

σ_B - предел прочности

E - модуль упругости

T_K - температура в зоне контакта

$T_{пл}$ - температура плавления материала

β - коэффициент объёмного расширения

κ - 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

λ_C - теплопроводность среды

R_K – контактное термическое сопротивление, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$

d – диаметр образцов, м

l – длина образцов, м

$P_{нагр}$ – мощность нагревательного элемента, Вт

α – термическая контактная проводимость, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, теплоотдача, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Список литературы

1. 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 Московского авиационного института. 2010. Т. 17, N 3. С. 135-143.
2. Кошлаков В.В., Миронов В.В. Перспективы применения композиционных материалов в ракетных двигателях // Ракетно-космические двигательные установки: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. Москва. МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2008. С. 10—11.
3. M. Ortelt, F. Breede, A. Herbertz, D. Koch, H. Hald // Current activities in the field of ceramic based rocket engines. ONERA-DLR Aerospace Symposium. 27.-29. Mai 2013. Palaiseau (Paris), Frankreich.
4. Мальков В.А., Фаворский О.Н., Леонтьев В.Н. Контактный теплообмен в газотурбинных двигателях и энергоустановках. – М.: Машиностроение, 1978. - 144 с.
5. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. - М.: Энергия, 1977. - 327 с.
6. Попов, В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. - М.: Энергия, 1971. - 216 с.
7. Меснянкин С.Ю. Методы расчёта и регулирования контактных термических сопротивлений // Сборник научных трудов «Тепловое проектирование систем». М.: Изд-во МАИ. 1990. С.78-86
8. 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.
9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин и др. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей. Учебное издание. - М.: Машиностроение, 1989. - 424 с.

16. Holm R. Electric Contacts: Theory and Applications. New York: Springer-Verlag. 1967. 486 p.

17. Holm R. Contact resistance especially at carbon contact // Zeitschrift fur Technische Physik. 1922. Vol. 3. N. 9. P. 290-294

18. Мурашов М.В., Панин С.Д., Климов С.М. Численное моделирование электрической проводимости контактов шероховатых тел // Наука и образование. 2015. N 1. С.189-200
19. 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. N. 24.
20. Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism. Vol. 1. Oxford: Clarendon press. 1873.453 p.
21. Pennec F. Modelisation du contact metal-metal: Application aux microconmutateurs MEMS RF. PhD These. Universite de Toulouse. 2009. 190 P.
22. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. - М.: Металлургия. 1978. - 392 с.
23. Ганин Е.А. Физическая модель контактного теплообмена // Теплотехнические проблемы энергосберегающих технологий в технике и легкой промышленности. 1989. С. 6-22.
24. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П., Кузнецов Ю.В. Анализ тепловой модели контактного теплообмена шероховатых поверхностей // Инженерно-физический журнал. 1980. Т. 38. N 3. С.441-449.
25. 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.
26. Barry G.W., Goodling J.S. A Stefan problem with contact resistance // ASME J. Heat. Transfer. 1987. Vol.109. P.820-826.
27. Бурдо О.Г., Вискалова И.М., Соколовская П.Б. Исследование контактной теплопередачи методом электротепловой аналогии // Приборостроение. 1989. N 20. С.86-90.
28. 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. N. 4. P. 489-494.

29. Мадхусудана К.В., Флетчер Л.С. Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия // Аэрокосмическая техника. 1987. N 3. С.103-121.
30. Харитонов В.В., Якутии Н.В. Контактный теплообмен разнородных материалов // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. N 2. С.1-6.
31. 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. N 8. С.97-98.
32. 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.
33. Барановский Э.Ф., Севастьянов П.В. Исследование контактного теплообмена при намораживании на движущихся кристаллических заторах // Вестник АН БССР. Серия физико-технических наук. 1983. N 1. С.59-62.
34. Пономарев Б.П. Влияние качества контактных соединений на локализацию температурного поля // Полупроводниковые приборы и преобразовательные устройства. Проектирование, расчет, моделирование, контроль. 1986. С. 4-12.
35. Попов В.М. Термическое сопротивление контакта волнистых поверхностей в вакууме. ИФЖ. 1974. Т. 27. № 5. С. 811-817.
36. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1988. - 286 с.
37. Мешков В.В., Зоренко Д.А.. САЕ-моделирование температурных полей поверхности трения с учетом экспериментально определенной субмикрорегеометрии. // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2014. N 7. С. 25-29

38. Ежов А.Д. Определение контактного термического сопротивления пары: композиционный материал C-Si-C и титановый сплав // Труды МАИ. 2015. N 82. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/34e/ezhov_rus.pdf
39. Меснянкин С.Ю., Диков А.В. Численный расчет теплового контактирования твердых тел. От моделей до реальных поверхностей // Тепловые процессы в технике. 2014. N 5. С. 230-235.
40. 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.
41. 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 .
42. 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 P.
43. 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
44. 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. N 47, P.1091-1098
45. Ayers, G.H.: Cylindrical thermal contact conductance. Master's Thesis, Texas A&M University, College Station, Texas, USA (2003)
46. Jackson, R.L., Bhavnani, S.H., Ferguson, T.P: A multiscale model of thermal contact resistance between rough surfaces. // Journal of Heat Transfer. 2008. N 130. 81301
47. 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. N 42. P. 2363-2374

48. 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)

49. 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. N 35. P. 767-785

50. 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,

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. Ежов А.Д. Численное решение задачи контактного взаимодействия шероховатых поверхностей энергетических установок. // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. N 1. С. 68-79.

56. 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.269-270.

57. 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.

58. Попов В.М., Краснобородько А.И. К определению термического контактного сопротивления в газовой среде // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 28. N 5. С. 875-883.

59. Попов В.М., Лушникова Е.Н., Черноухов П.А. Тепловое контактирование металлических поверхностей с оксидными пленками. //Лесотехнический журнал. 2012. N 1. С. 7-12.

60. Bahrami, M., Yovanovich, M.M., Marotta, E.E.: Thermal joint resistance of polymer- metal rough interfaces. // Journal of Electronic Packaging. 2006. N 128, P. 23-29.

61. Gibbins, J.: Thermal contact resistance of polymer interfaces. PhD thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada (2006)

62. Prasher, R.: Thermal interface materials: Historical perspective, status and future directions. // Proceedings of the IEEE. 2006. N 94(8). P. 1571-1586

63. Prasher, R.S., Matayabas, J.C.: Thermal contact resistance of cured gel polymeric thermal interface material. // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2004. N 27(4). P. 702-709

64. 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. N 198. P. 377-396

65. Wriggers, P., Reinelt, J.: Multi-scale approach for frictional contact of elastomers on rough rigid surfaces. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2009. N 198. P.1996-2008

66. Greenwood J.A. Constriction resistance and the real area of contact. // British Journal of Applied Physics. 1966. Vol. 17. N.12. P.1621-1632.

67. 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.
68. Martin K.A., Yovanovich M.M. Method of moments formulation of thermal constriction resistance of arbitrary contacts // AIAA Pap..1984. N 1745. P. 7.
69. Kennedy F.E., Cullen S.C. Contact temperature and its effects in an oscillatory sliding contact // Trans. ASMS Journal Tribology.1988. vol 111. N 21. P. 63-69.
70. Kuhlmann-Wiesdorf. D. Temperatures in interfacial contacts slots: dependence on velocity and on role reversal of two materials in sliding contact // ASMS Journal of Tribology. 1987. Vol. 109. P. 321-329.
71. Xu J., Fisher T.S. Enhanced thermal contact conductance using carbon nanotube arrays // Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electric Systems IThERM. 2004. Vol 2. P. 549-555.
72. Fletcher L.S. Recent developments in contact conductance heat transfer // Journal of heat transfer. 1988. Vol. 110/1059. P. 1059-1070.
73. Родерик. Э.Х. Контакты металл-полупроводник: // пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1982. - 208 с.
74. Викулов Д.Г., Меснянкин С.Ю. Термoeлектрическое взаимодействие в контакте металл-полупроводник // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. 2006. Т. 8. С. 43-44.
75. Eid J.C., Antonetti V.W. Small scale thermal contact resistance of aluminum against silicon // Proceedings of the 8th international heat transfer conference. San Francisco, CA, 1986, P. 659-664.
76. Меснянкин С.Ю. Контактная теплопроводность разнородных материалов // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. 1998. Т.7. С. 165-167.
77. Blondel C., Roquessalance R., Testard O.A., Latimer P., Viratelle D. Carbon.-carbon. composite: A strong material with few thermal conductivity and thermal contact for rigid optical assemblies at low temperature // Cryogenics. 1989. P. 89.

78. Меснянкин С.Ю. Современный подход по учету контактных термических сопротивлений в энергетических установках // Сборник тезисов докладов V Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск. НАН Беларуси. 24-28 мая 2004. электронная версия

79. 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». Калуга. 23-27 мая 2005. Т. 2. С. 308-311.

80. Меснянкин С.Ю. Контактная теплопроводность и пути ее увеличения // Сборник тезисов докладов IV Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск. 2004. Т. 3. С. 363-366.

81. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 277 с.

82. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. - М.: Машиностроение, 1981. - 224 с.

83. Свириденко А. И., Чижик С. А., Петроковец М. И. Механика дискретного фрикционного контакта. - Минск : Наука и техника, 1990. - 272с.

84. Витенберг Ю. Р.. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. - Л.: Судостроение, 1971. - 108 с.

85. Nayak P.R. Random Process Model of Rough Surfaces // Journal of Lubrication Technology. 1971. P. 398-407.

86. Семенюк Н.Ф. Сиренко Г.А.. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля. // Трение и износ. 1980. Т.1. N 6. С. 1010 - 1020

87. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А.. Шероховатость поверхностей, теоретико-вероятностный подход. - М.: Наука, 1971. - 340 с.

88. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение контактной жёсткости соединений. - М.: Наука, 1977. - 102 с.

89. Рудзит Я. А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. - Рига: Зинатне, 1975. - 210 с.

90. Огар П. М., Корсак И. И. Влияние характеристик тяжело нагруженного стыка шероховатых поверхностей на герметичность. - Братск: БрИИ, 1989. - 100 с.
91. Измайлов В.В., Новоселова М.В.. О фактической и физической площадях дискретного контакта. // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2015. N 8. С. 4-10
92. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.
93. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. - М.: Машиностроение, 1966. - 352 с
94. Осипов А.П.. Моделирование шероховатой поверхности методом суперпозиции относительных опорных кривых. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2002. N 16. С. 168-174.
95. Пашовкин С.А.. Модель контакта шероховатых поверхностей с учетом маслостойкости в зоне контакта. // Известия ВУЗ. Машиностроение. 2008. N 12. С. 67-72.
96. Тарасов В.В., Сивцев Н.С.. Численное моделирование контакта шероховатых поверхностей. // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2007. N 1. С. 160-165.
97. Bhushan B. Principles and applications of tribology. ~ A Wiley-Interscience Publication, 1999. 1020 P.
98. 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. N 123. P. 330-342
99. 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. N 11(66). С. 54-58.

100. Popov Valentin L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation. // Springer-Verlag. 2009, P. 328
101. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage, 2001.
102. Popov Valentin L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications Springer-Verlag, 2010. 362 P.
103. S. Hyun, M. O. Robbins. Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small wavelengths. // Tribology International. 2007. Vol.40, P. 1413-1422.
104. I.N. Sneddon. The Relation between Load and Penetration in the Axisymmetric Bossiness Problem for a Punch of Arbitrary Profile.// International Journal Engineering Science. 1965. Vol. 3, P. 47-57.
105. Чернов Д.О., Сергеев Д.А., Мешков В.В.. О моделировании кинетики образования площади контакта шероховатых поверхностей. // Вестник Тверского государственного технического университета. 2012. N 20. С. 42-46.
106. 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.
107. Yan W., Komvopoulos K. Contact analysis of elastic-plastic surfaces // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. №. 7. P. 3617- 3624.
108. Маджумдар А., Бхушан Б. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей // Современное машиностроение. 1991. N 6. С. 11-23.
109. Hyun, et al. "Finite element analysis of contact between elastic self-affine surfaces." Phys. Rev. E 70, 026117 (2004)
110. 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.

111. 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.
112. 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
113. Wriggers, P.: Computational Contact Mechanics, 2nd edn. Springer, Berlin. 2006.
114. Komvopoulos. K. Elastic finite element analysis of multi-asperity // ASME Journal of Tribology. 1992. N 114. P. 823-831.
115. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. М.: Изд- во стандартов, 1982. 20 с.
116. Демкин, Н.Б. Топографические характеристики поверхности и точность их определения. // Механика и физика контактного взаимодействия. 1978. С. 16-29.
117. Zavarise, G.. Borri-Brunetto, M., Paggi, M.: On the reliability of microscopical contact models. // Wear. 2004. P. 229-245
118. Izmailov V.V. Correlation between surface topography and profile statistical parameters. // Wear. 1980. Vol. 59. P. 409-420.
119. Беркович, И.И. Расчет статистических характеристик шероховатой поверхности // Механика и физика контактного взаимодействия. 1977. С. 3-16.
120. Бенгтссон, А. Получение топографического изображения поверхности с помощью профилографа. // Трение и износ. 1986. Т. 7. N 1. С. 27-35.
121. Демкин, Н.Б. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей. // Трение и износ. 2010. Т. 31. N 1. С. 7-15.
122. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. - М.: Наука, 2001. - 478 с.
123. Bhushan, B. Contact mechanics of rough surfaces intribology: multiple asperity contact / B. Bhushan // Tribology

124. 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. N 7. С. 29-41.
125. Грязев В.М. Моделирование реальной поверхности детали.//Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып.1. С. 192-200
126. Войнов К.Н., Ходаковский В.А., Шварц М.А. Математическое моделирование шероховатых поверхностей. // Трение, износ, смазка. 2009. N 41. С.1-9
127. Дьяченко П. Е., Вайнштейн В. Э., Розенбаум Б. С. Количественная оценка неровностей обработанных поверхностей - М.: Изд-во АН СССР, 1952. – 129 с.
128. Дунин-Барковецкий И. В., Карташова А. Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности - М.: Машиностроение, 1978. - 232 с.
129. В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов Инженерный анализ в Ansys Workbench / Учебное пособие. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. - 271 с.
130. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
131. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

Приложения**Текст программы для микроконтроллера.**

```
//#include <MAX6675.h>
#include "max6675.h"
int thermoDO1 = 2;
int thermoCS1 = 3;
int thermoCLK1 = 4;
int thermoDO2 = 8;
int thermoCS2 = 9;
int thermoCLK2 = 10;
int thermoDO3 = 22;
int thermoCS3 = 24;
int thermoCLK3 = 26;
int thermoDO4 = 28;
int thermoCS4 = 30;
int thermoCLK4 = 32;
int thermoDO5 = 34;
int thermoCS5 = 36;
int thermoCLK5 = 38;
int thermoDO6 = 40;
int thermoCS6 = 42;
int thermoCLK6 = 44;
int thermoDO7 = 46;
int thermoCS7 = 48;
int thermoCLK7 = 50;
int thermoDO8 = 41;
int thermoCS8 = 43;
int thermoCLK8 = 45;
```

```
int thermoDO9 = 47;  
int thermoCS9 = 49;  
int thermoCLK9 = 51;
```

```
int stroka=0;  
int LABEL =1;  
int row1=0;  
int row2=0;  
int row3=0;  
int row4=0;  
int row5=0;  
int row6=0;  
int row7=0;  
int row8=0;  
int row9=0;
```

```
int Relay = 11;  
int fanCtrlPin = 12;  
int Press = A0;
```

```
MAX6675 thermocouple1(thermoCLK1,thermoCS1, thermoDO1);  
MAX6675 thermocouple2(thermoCLK2,thermoCS2, thermoDO2);  
MAX6675 thermocouple3(thermoCLK3,thermoCS3, thermoDO3);  
MAX6675 thermocouple4(thermoCLK4,thermoCS4, thermoDO4);  
MAX6675 thermocouple5(thermoCLK5,thermoCS5, thermoDO5);  
MAX6675 thermocouple6(thermoCLK6,thermoCS6, thermoDO6);  
MAX6675 thermocouple7(thermoCLK7,thermoCS7, thermoDO7);  
MAX6675 thermocouple8(thermoCLK8,thermoCS8, thermoDO8);  
MAX6675 thermocouple9(thermoCLK9,thermoCS9, thermoDO9);
```

```

int vccPin = 5;
int gndPin = 6;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  TCCR3B = (TCCR3B & 0xF8) | 0x01; // timer 3 (pins 2,3,5)
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Vremya,Temp1,Temp2,Temp3,Temp4,Temp5,Temp6,Temp7,Temp8,Temp9,Press,Stroka");
  //Serial.println("LABEL,val,ROW,ROW,ROW,ROW,ROW,ROW,ROW,ROW,ROW,ROW,Stroka");

  pinMode(vccPin, OUTPUT); digitalWrite(vccPin, HIGH);
  pinMode(gndPin, OUTPUT); digitalWrite(gndPin, LOW);
  pinMode(Relay, OUTPUT);
  delay(500);
}

void loop() {
  analogWrite(fanCtrlPin, 240);
  row1=thermocouple1.readCelsius();
  row2=thermocouple2.readCelsius();
  row3=thermocouple3.readCelsius();
  row4=thermocouple4.readCelsius();
  row5=thermocouple5.readCelsius();
  row6=thermocouple6.readCelsius();
  row7=thermocouple7.readCelsius();
  row8=thermocouple8.readCelsius();
  row9=thermocouple9.readCelsius();

```

```
stroka++;
```

```
float pressure = analogRead(Press)/1024.000;
```

```
Serial.print("DATA,TIME,");
```

```
Serial.print(row1);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(row2);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(row3);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(row4);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(row5);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(row6);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(row7);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(row8);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(row9);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(pressure);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.println(stroka);
```

```
if (row1>250)
```

```
{
```

```
    digitalWrite(Relay, HIGH);
```

```
}  
else  
{  
    digitalWrite(Relay, LOW);  
}  
  
delay(1000);  
  
}
```

Текст программы определения точек шероховатости поверхности.

```
program SURFACE2
```

```
real sigma,Pmax,pi,m,Pmin,x,Potr(10),Xotr,Pabs(11),Psum,ProcAver(11)
```

```
real L,Rz,Ra,Resource(5,14),Sm,Raleft(11),Raright(11),Ra1,ran,L1,Rad
```

```
Real, allocatable :: Rainl(:,:),Rainr(:,:),Rainleft(:),Rainright(:)
```

```
Real, allocatable :: RaVol(:,:),RaItog(:),RaVolx2(:,:),RaVolx3(:,:)
```

```
integer i,k,T,Tp(11),Tpright(11),Tpleft(11),p,STR,STL,S,j,r,var,mix,mix1
```

```
integer Sx2,q,var2
```

```
character*70 cfile,bfile
```

```
character*20 ca,cd,cb
```

```
m=0
```

```
sigma=1
```

```
pi=3.1415926535
```

```
t=0
```

```
i=1
```

```
Pmin=1
```

```
!Часть вводимая пользователем:
```

```
Write(*,*) '          PROGRAM -SURFACE-          '
```

```
Write(*,*) 'Developer: Ezhov Alexey'
```

```
Write(*,*) "
```

```
Write(*,*) 'Welcome to construct points of roughness! Will you use YOUR DATA(1)or  
GOST(2)?'
```

```
read (*,*) var
```

```
if (var==1) then
```

```

write(*,*) 'Determing Ra[mkm]='
read (*,*) Ra

```

```

!   write(*,*) 'Determing Sm[mkm]='
!   read (*,*) Sm

```

```

Write(*,*) 'Calculate Sm(1) or you input Sm(2)?'
read (*,*) var2

```

```

if (var2==1) then
    ! ВЫЧИСЛЯЕМ ЗНАЧЕНИЕ SM
    Sm=7.7569*Ra+14.243
    Write(*,*) 'Sm=',Sm
else
    write(*,*) 'Determing Sm[mkm]='
    read (*,*) Sm
end if

```

```

Write(*,*) 'Base lenght L[mkm]='
read(*,*) L1
write(*,*) 'Thank you!'
else
    Write(*,*) 'Class of roughness (1-14)='
    read(*,*) k
    Write(*,*) 'Base lenght L[mkm]='
    read(*,*) L1

```

```

!   write(*,*) 'Determing Sm[mkm]='
!   read (*,*) Sm
!       ВЫЧИСЛЯЕМ ЗНАЧЕНИЕ SM

```

$$S_m = 7.7569 \cdot R_a + 14.243$$

```

        Write(*,*) 'Sm=',Sm
    Open (15,File='Resource.txt')
    Read(15,*) Resource
    ! Обращаемся к файлу для считывания информации о значениях Ra,Rz,L
    L=Resource(2,k)    ! Базовая длина
    Ra=Resource(3,k)   ! Ra
    Rz=Resource(4,k)   ! Rz
    !   Sm=Resource(5,k)   ! Sm
end if

```

a=Ra

d=L1

```

Open (25,File='Result.txt')

```

```

    if (L1==L) then

```

```

        L1=L

```

```

    else

```

```

        L=L1

```

```

    end if

```

$$R_a = (10^{**6}) * (10^{*(-5.21 + 0.98 * \log_{10}(R_a))}) / 1.25$$

```

write(*,*) 'h_aver=', Ra

```

!Максимальная вероятность стандартного нормального распределения(m=0)

```
Pmax=1.0/(sigma*sqrt(2*pi))*exp(-(t-m)**2/2*sigma**2)
```

```
write(*,*) Pmax
```

```
x=0
```

!Определяем когда вероятность приближается к 0 и при каком значении x это наступает:

```
do while (Pmin>=0.00001)
```

```
    x=x+0.00001
```

```
    Pmin=1.0/(sigma*sqrt(2*pi))*exp(-(x-m)**2/2*sigma**2)
```

```
end do
```

```
write(*,*) 'Pmin=', Pmin
```

```
read(*,*)
```

!Разделим промежуток от Pmax до Pmin на 10 отрезков (справа от Pmax)

```
Do i=1,10
```

```
    Xotr=x*i/10
```

```
    Potr(i)=1.0/(sigma*sqrt(2*pi))*exp(-(Xotr-m)**2/2*sigma**2)
```

```
end do
```

!Вычислим абсолютную вероятность выпадания чисел на каждом интервале:

```
Do i=1,11
```

```
    if (i==1) then
```

```
        Pabs(i)=Pmax/Pmax
```

```
    else
```

```
        Pabs(i)=Potr(i-1)/Pmax
```

```
    end if
```

end do

!Вычислим сколько процентов от всех точек приходится на каждый интервал:

$P_{sum} = \text{sum}(P_{otr}) + P_{max}$

Do i=1,11

if (i==1) then

$ProcAver(i) = P_{max} / P_{sum}$

else

$ProcAver(i) = P_{otr}(i-1) / P_{sum}$

end if

end do

write(*,*) ProcAver

read(*,*)

$T_p = 0$

!Расчёт общего количества точек(T)

$T = L / S_m$

!Расчет количества точек на каждом интервале

Do i=1,11

$T_p(i) = ProcAver(i) * T$

End do

STR=0

STL=0

!Для каждой стороны в частности, общее количество точек

Do i=1,11

$T_{pright}(i) = T_p(i)/2$

$T_{pleft}(i) = T_p(i) - T_{pright}(i)$

$STR = STR + T_{pright}(i)$

$STL = STL + T_{pleft}(i)$

end do

$S = STL + STR$

$Sx2 = 2 * S$

allocate (Rainl(STL,10))

allocate (Rainr(STR,10))

allocate (Rainleft(STL))

allocate (Rainright(STR))

allocate (RaItog(S))

allocate (RaVol(S,S))

allocate (RaVolx2(Sx2,Sx2))

allocate (RaVolx3(Sx2,Sx2))

write (*,*) STR, STL

!Значение Ra на концах подинтервалов слева

Do i=1,11

$R_{left}(i) = Ra * P_{abs}(i)$

 write(*,*) $R_{left}(i)$

end do

!Значение Ra на концах подинтервалов справа

Do i=1,11

```

    Raright(i)=2*Ra-Raleft(i)
    write(*,*) Raright(i)
end do

read(*,*)

p=0
!Значения Ra в самих подинтервалах (левый)

do i=1,10
    do k=1,Tpleft(i)
        Rainl(k,i)=Raleft(i)-(Raleft(i)-Raleft(i+1))*k/Tpleft(i)
        p=p+1
        Rainleft(p)=Rainl(k,i)
    end do
end do

!Значения Ra в самих подинтервалах (правый)
p=0
do i=1,10
    do k=1,Tpright(i)
        Rainr(k,i)=Raright(i)+(Raright(i+1)-Raright(i))*k/Tpright(i)
        p=p+1
        Rainright(p)=Rainr(k,i)
    end do
end do

!Занесем все значения Ra в один массив

RaItog=0

```

Do i=1,STL

 p=STL-i+1

 RaItog(p)=Rainleft(i)

End do

Do i=1+STL,STL+STR

 RaItog(i)=Rainright(i-STL)

end do

!Перемешиваем значения Ra

Do j=1,10

 Do i=1,S

 45 CALL RANDOM_NUMBER(ran)

 r=j+ran*10000

 if (r<=S) then

 Ra1=RaItog(i)

 RaItog(i)=RaItog(r)

 RaItog(r)=Ra1

 else

 go to 45

 end if

 end do

end do

!Объёмное распределение Ra:

Do i=1,S

 Do j=2,S+1

```

      If (j<=S) then
          Ravol(i,j-1)=RaItog(j)
      else
          Ravol(i,j-1)=RaItog(1)
      end if
  end do
end do

```

```

      Do p=1,s
          RaItog(p)=Ravol(i,p)
      end do
end do

```

!Перемешиваем значения Ra в массиве mix1 раза

```

write(*,*) 'Number of mixing dotes?'
read(*,*) mix1

```

```

Do mix=1,mix1
    Do j=1,S
        Do i=1,S
            55 CALL RANDOM_NUMBER(ran)
            r=j+ran*10000
            if (r<=S) then
                Ra1=Ravol(i,j)
                Ravol(i,j)=Ravol(j,r)
                Ravol(j,r)=Ra1
            else
                go to 55
            end if
        end do
    end do

```

```

        end do
    end do

    RaVolx2(1,1)=Ravol(1,1)

    Do i=1,S
        Do j=2,S
            RaVolx2(2*i-1,2*j-1)=Ravol(i,j)
        end do
    end do

    Do i=1,2*S-1,2
        Do j=2,2*S-1,2
            RaVolx2(i,j)=(RaVolx2(i,j-1)+RaVolx2(i,j+1))/2
        end do
    end do

    Do j=1,2*S-1
        Do i=2,2*S-1,2
            RaVolx2(i,j)=(RaVolx2(i-1,j)+RaVolx2(i+1,j))/2
        end do
    end do

    !Написание названия файла!

    write(ca,'(F8.2)') a
    write(cb,'(F15.2)') d
    bfile='Ra=//trim(ca)//_ploskost_baselenght=//trim(cb)//.txt'
    Open (15,File=bfile)

```

```
write(*,*) bfile
```

```
do j=1,2*S-1
```

```
    Do i=S,1,-1
```

```
        k=j-1
```

```
        RaVolx3(i,j)= RaVolx2(i,j) - (Rad-sqrt(Rad**2-(k*Sm/2)**2))
```

```
    end do
```

```
end do
```

```
k=1
```

```
do j=1,2*S-1
```

```
    Do i=S+1,2*S-1
```

```
        k=j-1
```

```
        RaVolx3(i,j)= RaVolx2(i,j) - (Rad-sqrt(Rad**2-(k*Sm/2)**2))
```

```
    end do
```

```
end do
```

```
Do i=1,2*S-1
```

```
    do j=1,2*S-1
```

```
        write (35,*) i*Sm/2,j*Sm/2,RaVolx3(i,j)
```

```
    end do
```

```
end do
```

```
read(*,*)
```

```
write(*,*) '-----'
```

```
write(*,*) 'Solve complete!'
```

```
write(*,*) '-----'
```

```
read(*,*)
```

```
end
```