

УДК 536.231

**Определение контактного термического сопротивления пары:
композиционный материал C-Si-C и титановый сплав**

Ежов А.Д.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: ezzhov@gmail.com*

Аннотация

В задачах расчета теплового состояния конструкции авиационной и ракетно-космической техники часто используются соединения деталей из перспективных материалов, поведении которых в зонах контактов с другими материалами не всегда известны. В данной работе рассмотрена задача определения контактного термического сопротивления между парой материалов – углерод-углеродный композиционный материал и титановый сплав. Выполнено сопоставление с расчетными зависимостями ряда авторов, которое показало совпадение с наиболее широко применяемыми соотношениями.

Ключевые слова: контактное термическое сопротивление, площадь контакта, моделирование шероховатой поверхности.

Введение

Достоверное знание значения контактного термического сопротивления (КТС) является одним из ключевых факторов при проектировании термонагруженных энергетических систем авиационной и ракетно-космической техники [1]. В первую очередь, это связано с тем, что знание распределения температурных полей в изделии, величину и направление тепловых потоков в нем, является неременным условием при разработке такой конструкции.

Определяющим фактором, при расчете КТС является шероховатость поверхности. До недавнего времени подходы, описывающие микрорельеф, в основном были смоделированы аналитически, с применением различного вида допущений и упрощений [2-6]. Подобного рода допущения могут приводить к существенным искажениям в описании реального рельефа поверхности, которые сказываются на расчетных зависимостях КТС.

Современное состояние 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 рассчитать напряженно-деформированное состояние тела в плоскости контакта и распределение температурного поля на шероховатой поверхности. Используя рассчитанные величины, можно с достаточной достоверностью, без использования эмпирических коэффициентов, получить значение КТС для широкого диапазона давлений и температур.

Модель соприкасающихся поверхностей

Программной средой, позволяющей проводить детальный анализ теплового и напряженно-деформированного состояния конструкции, является среда междисциплинарного анализа ANSYS Multiphysics [7]. Выбор данной программной среды обусловлен возможностью использования одной конечно-элементной модели, с соответствующим набором параметров, при выполнении сопряженного анализа тепловой и прочностной задачи. Подобный подход позволяет значительно упростить моделирование междисциплинарной задачи. Это дает возможность выполнять основные этапы (создание, решение и последующая обработка результатов) широкого набора задач междисциплинарного взаимодействия для одной расчетной модели.

Описание геометрии соприкасающихся тел проведено по алгоритму, предложенному в работе [8]. В данном случае рассматривается контакт поверхностей углерод-углерод композиционного материала C-Si-C с величиной шероховатости поверхности $Ra = 12,5$ мкм и титанового сплава ТВ-36 с $Ra = 6,3$ мкм. Результат моделирования представлен на рис.1

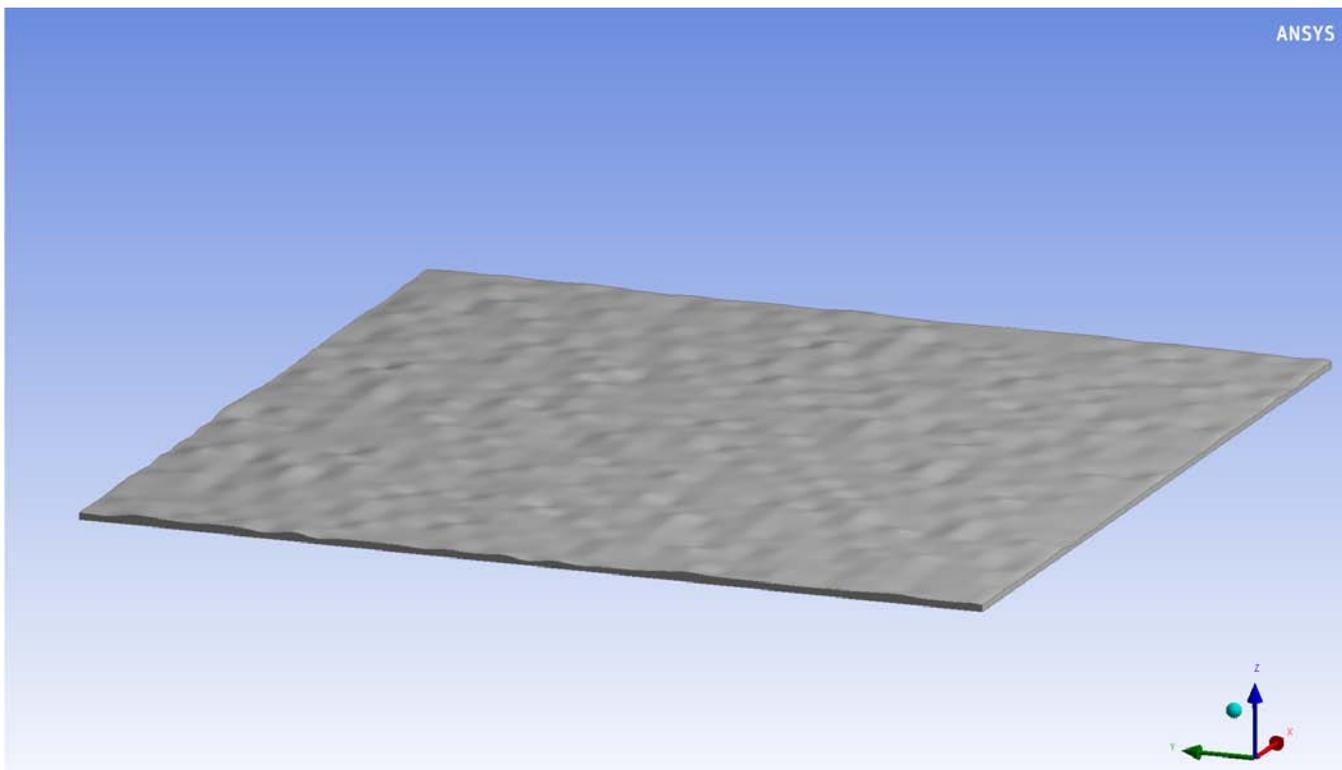


Рис.1. 3-х мерная модель шероховатой поверхности

Определение типа контакта между соприкасающимися поверхностями играет существенную роль, как в определении температурного поля, так и в напряженно-деформированном состоянии системы. Поскольку модели образцов не скреплены друг с другом, а могут перемещаться относительно друг друга, то был выбран тип контакта - Frictional (на трении).

Для получения численного решения использовалось разбиение геометрических моделей конечно-элементной сеткой. Данная процедура выполняется в модуле симуляции Mechanical. Расчетная сетка генерируется на геометрической модели и является основой для составления и решения системы уравнений в матричном виде. В данной работе производилась генерация сетки с задаваемыми пользователем установками, поскольку автоматическая генерация

сетки с установками по умолчанию недостаточно корректно описывает расчетную область.

По результатам генерации сетки было получено 625093 элементов и 1159633 узлов (Рис.2.).

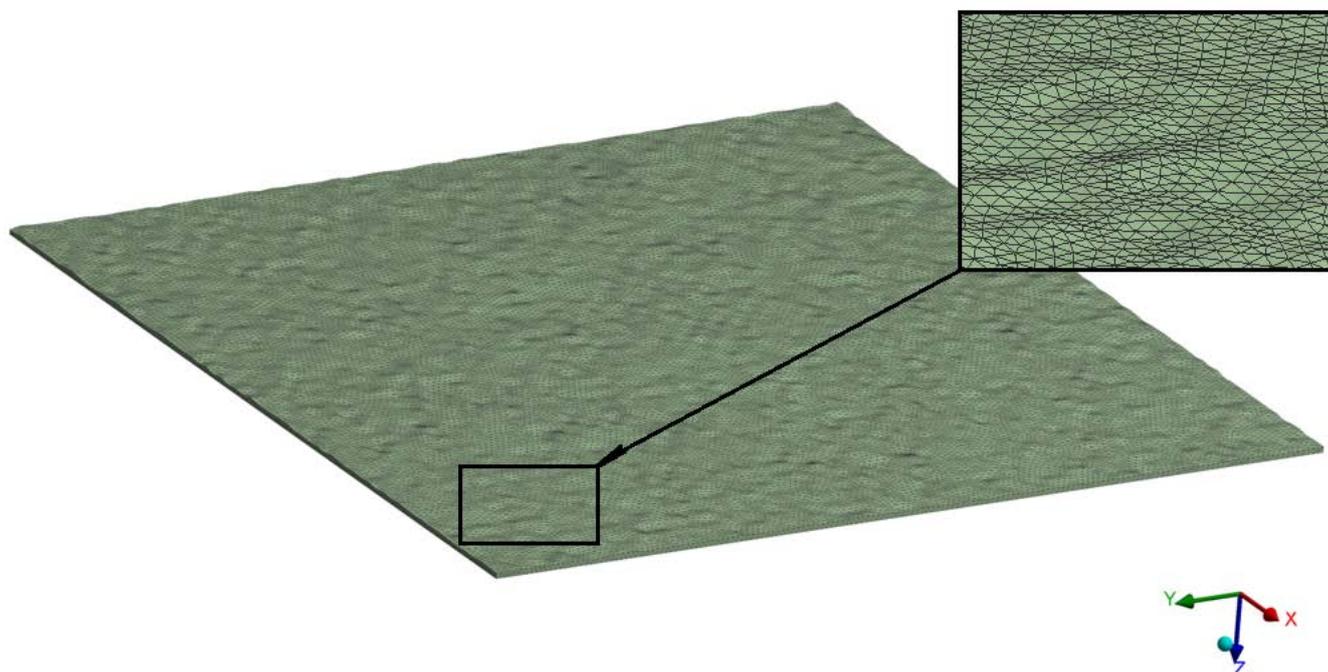


Рис.2. Конечно-элементная модель шероховатой поверхности.

Прочностной расчет

Основная сложность прочностного расчета состоит в определении механической нагрузки, сжимающей поверхности между собой, поскольку эта величина определяет смятие вершин микронеровностей соответственно величину фактической площади контакта. Данная задача была решена путем выполнения прочностного расчета в стационарной постановке, в системе Static-Structural. Граничные условия по боковым поверхностям модели задавались в качестве

скользящей заделки, нижняя модель – жестко закрепленная заделка, к верхней модели прикладывалась механическая нагрузка P , которая в дальнейшем, для повышения производительности вычислений, была запараметризована (включена в свойства расчета Parameter Set). Вектор механической нагрузки P направлен по нормали к поверхности, и принимался равным в диапазоне от $10 \cdot 10^5$ до $120 \cdot 10^5$ Па (Рис.3).

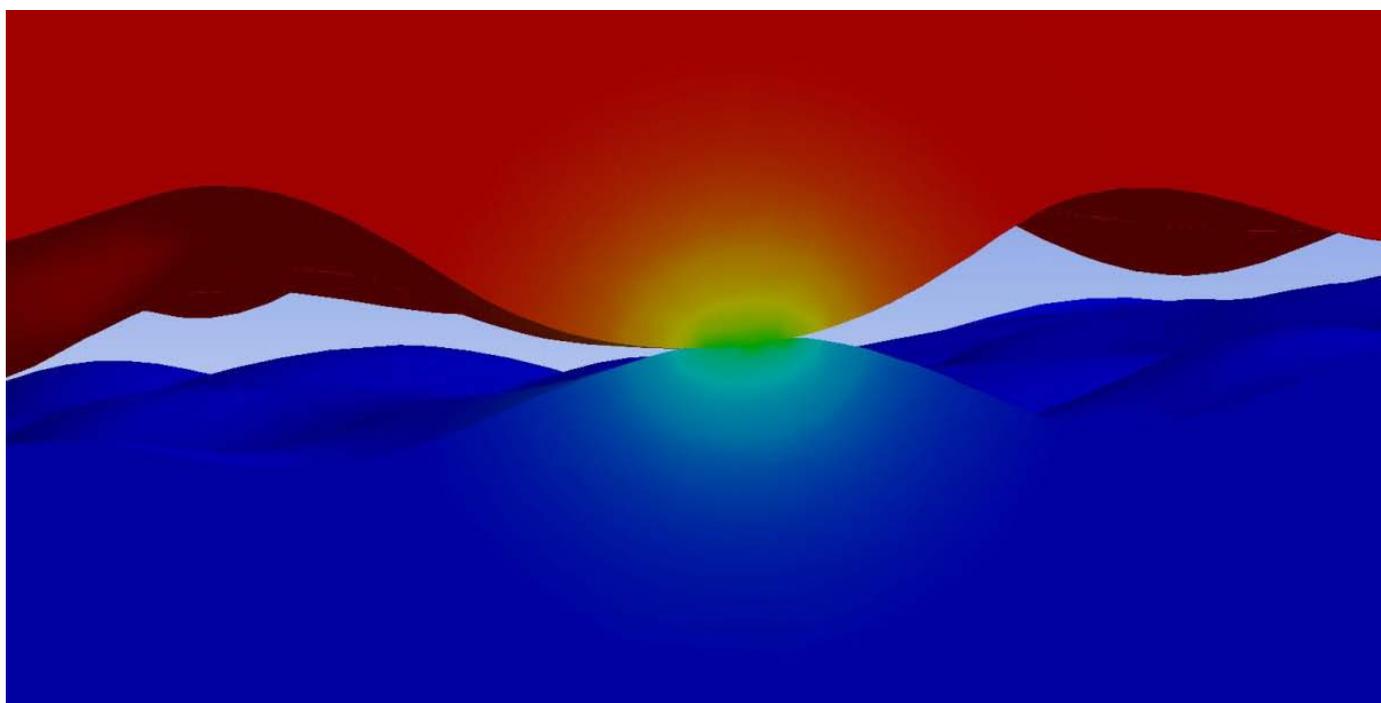


Рис.3. Контакт шероховатых поверхностей.

Основным результатом проведения прочностного расчета является распределение полей давления, деформация микрогеометрии в результате нагрузки, а так же поле эквивалентных напряжений.

Одним из результатов, полученных после анализа, является перемещение верхней плоскости относительно нижней - D . Данное перемещение легло в основу перестроения трехмерной геометрии шероховатости (Рис.4).

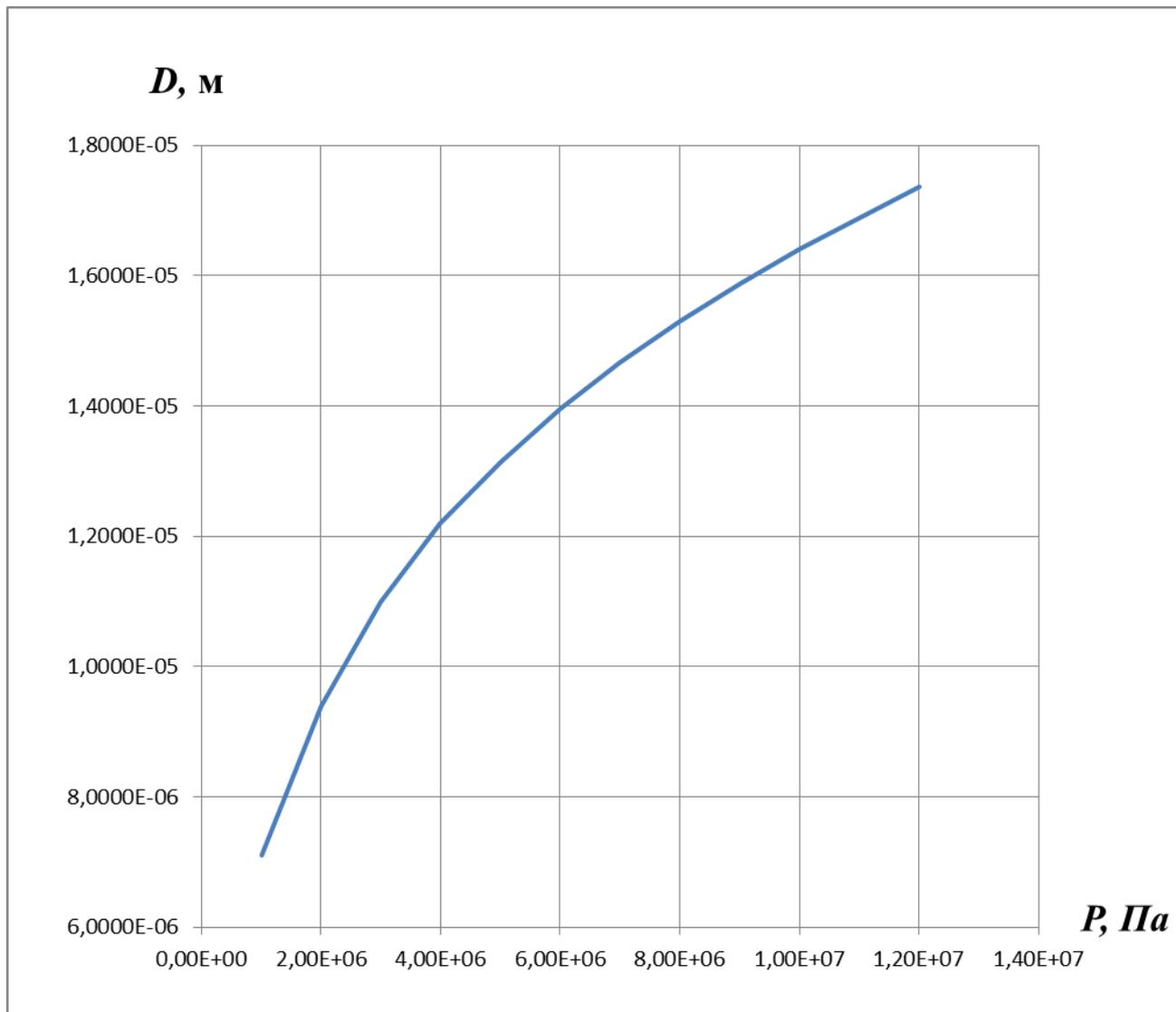


Рис.4. График зависимости перемещения верхней плоскости относительно нижней.

Характер кривой (Рис.4) объясняется тем, что с увеличением значения приложенной нагрузки, увеличивается число вступающих в контакт микровыступов рельефа поверхности, соответственно увеличивая площадь фактического контакта, и уменьшая величину давления.

На следующем этапе моделирования контакта поверхностей задавалось их сближение на величину равную перемещению D . Таким образом, для теплового анализа были построены новые геометрии шероховатых поверхностей, с имеющимися площадями фактического контакта. На рисунке 5 площадь фактического контакта отображена красным цветом.

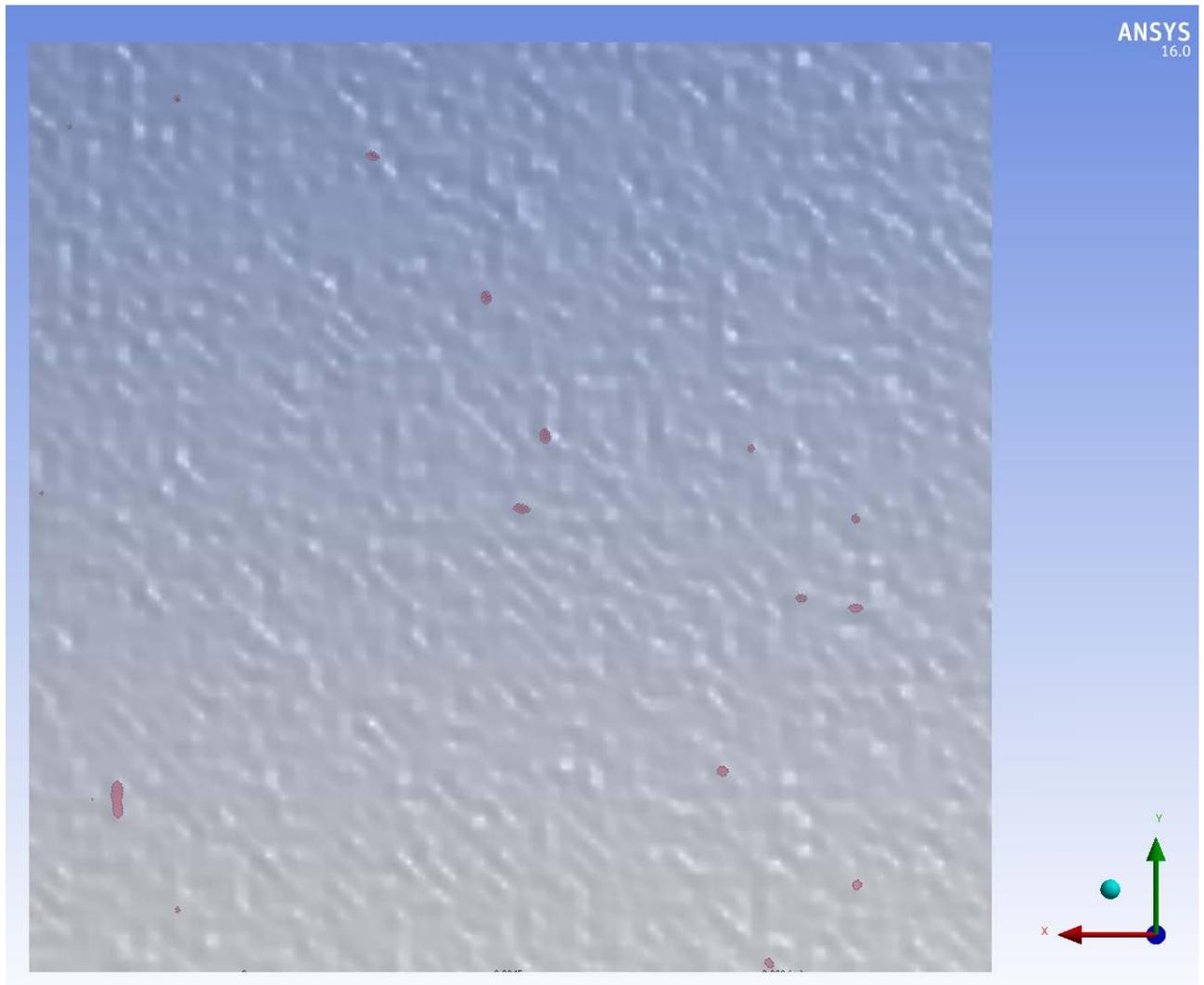


Рис.5. Фактическая площадь контакта

Как видно из приведенного рисунка, площадь фактического контакта составляет малую часть от номинальной площади контакта. (Под номинальной площадью контакта понимается полная площадь контактирующей поверхности). В

данном случае, фактическая площадь контакта, при значении механической нагрузки $P = 10^6$ Па составила $5,15 \cdot 10^{-4}$ % от номинальной, что совпадает с известными литературными сведениями [9,10]/

Тепловой расчет

В данной работе расчет проводился без учета конвективного теплообмена. Учитывался теплообмен между контактирующими поверхностями за счет теплопроводности через места фактического контакта и излучения от одной поверхности на другую. Во избежание ошибок, связанных с определением площади фактического контакта, было выбрано условие, что в начальной точке расчета поверхности контакта отстоят друг от друга на некотором расстоянии и могут соприкоснуться в процессе приложения нагрузки.

Тепловой расчет выполнялся в стационарной постановке, в системе Steady-State Thermal. Граничные условия по боковым поверхностям модели задавались как адиабатная стенка. На верхней границе задавалась температура равная $t_1 = 800$ °С, с нижней поверхности отводился тепловой поток, равный $q = 10^4$ Вт/м².

В результате расчета были получены значения температурного поля в межконтактной области (Рис.6.).

C: Steady-State Thermal

Temperature 4
Type: Temperature
Unit: °C

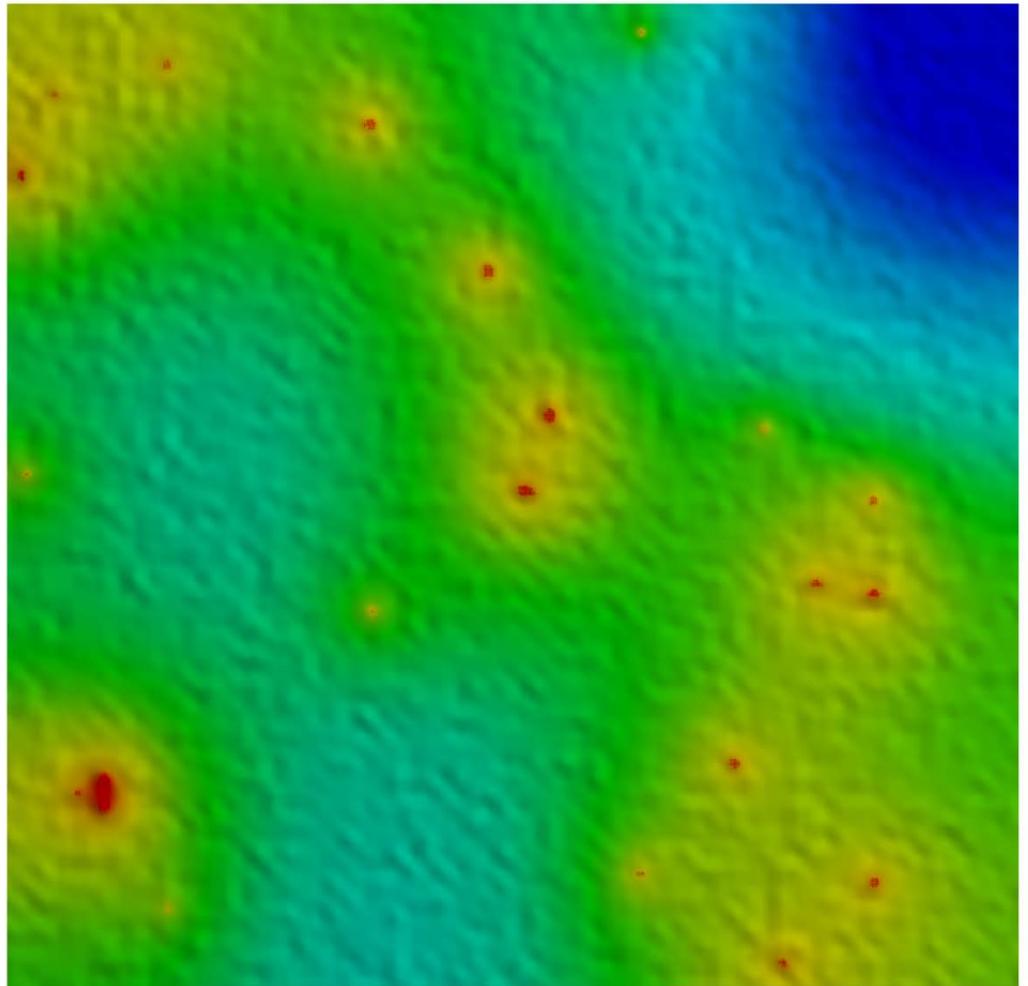
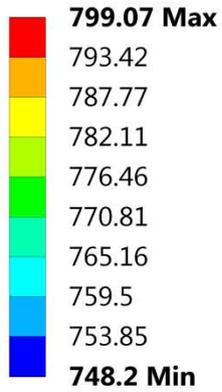


Рис.6. Температурное поле в зоне контакта.

По результатам теплового анализа были получены значения минимальных t_{min} и максимальных t_{max} температур в зоне контакта (табл.1), по которым в дальнейшем был произведен расчет КТС.

Табл.1. Результат теплового расчета.

Давление, Па	t_{min} °C	t_{max} °C	Δt , °C
$1 \cdot 10^6$	748,20	800,00	51,80
$2 \cdot 10^6$	761,13	800,00	38,87
$3 \cdot 10^6$	764,07	800,00	35,93
$4 \cdot 10^6$	765,42	800,00	34,58
$5 \cdot 10^6$	770,25	800,00	29,75
$6 \cdot 10^6$	772,08	800,00	27,92
$7 \cdot 10^6$	773,98	800,00	26,02
$8 \cdot 10^6$	775,15	800,00	24,85
$9 \cdot 10^6$	775,87	800,00	24,13
$10 \cdot 10^6$	776,29	800,00	23,71
$11 \cdot 10^6$	777,05	800,00	22,95
$12 \cdot 10^6$	775,15	800,00	24,85

Из рисунка 6 отчетливо видно, что линии теплового потока оказываются стянутыми к областям непосредственного соединения поверхностей.

Зная величину задаваемого теплового потока q , а так же рассчитанные ранее значения максимальной и минимальной температуры в зоне контакта, позволяют рассчитать значение R_k по следующей формуле:

$$R_k = \frac{t_{max} - t_{min}}{q} = \frac{800 - 748,2}{10^4} = 51,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2\text{К/Вт}$$

Результаты расчеты КТС для контактирующей пары из УУКМ и титанового сплава для диапазона давлений от $10 \cdot 10^5$ до $120 \cdot 10^5$ Па приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результат расчета R_K

$P, \text{ Па,}$ 10^{-6}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
$R_K,$ $\text{м}^2\text{К/Вт,}$ 10^4	51,8	38,87	35,93	34,58	29,75	27,92	26,02	24,85	24,13	23,71	22,95

С целью проверки полученных результатов, проведен корреляционный анализ, при этом в качестве аналитических зависимостей выбраны те, в которых отсутствуют эмпирические коэффициенты, требующие специальной методики определения. К ним относятся зависимости, полученные авторами [1,9,10,11].

Необходимо отметить, что приведенные зависимости были получены авторами по результатам обобщения экспериментальных данных для определённого класса задач.

Введение указанными исследователями постоянного размера пятна контакта для различных типов материалов не отражает физической сущности контактирования твердых тел. Неудобство использования проанализированных зависимостей заключается ещё и в том, что они предлагались авторами только для определённого круга материалов и в фиксированных диапазонах изменения безразмерной механической нагрузки.

Для проверки на адекватность предлагаемого метода расчета КТС, был выполнен расчет значений R_K во всем диапазоне применяемых нагрузок. На Рис.7 приведены сравнительные данные зависимости КТС от величины нагрузки, полученные автором и другими исследователями.

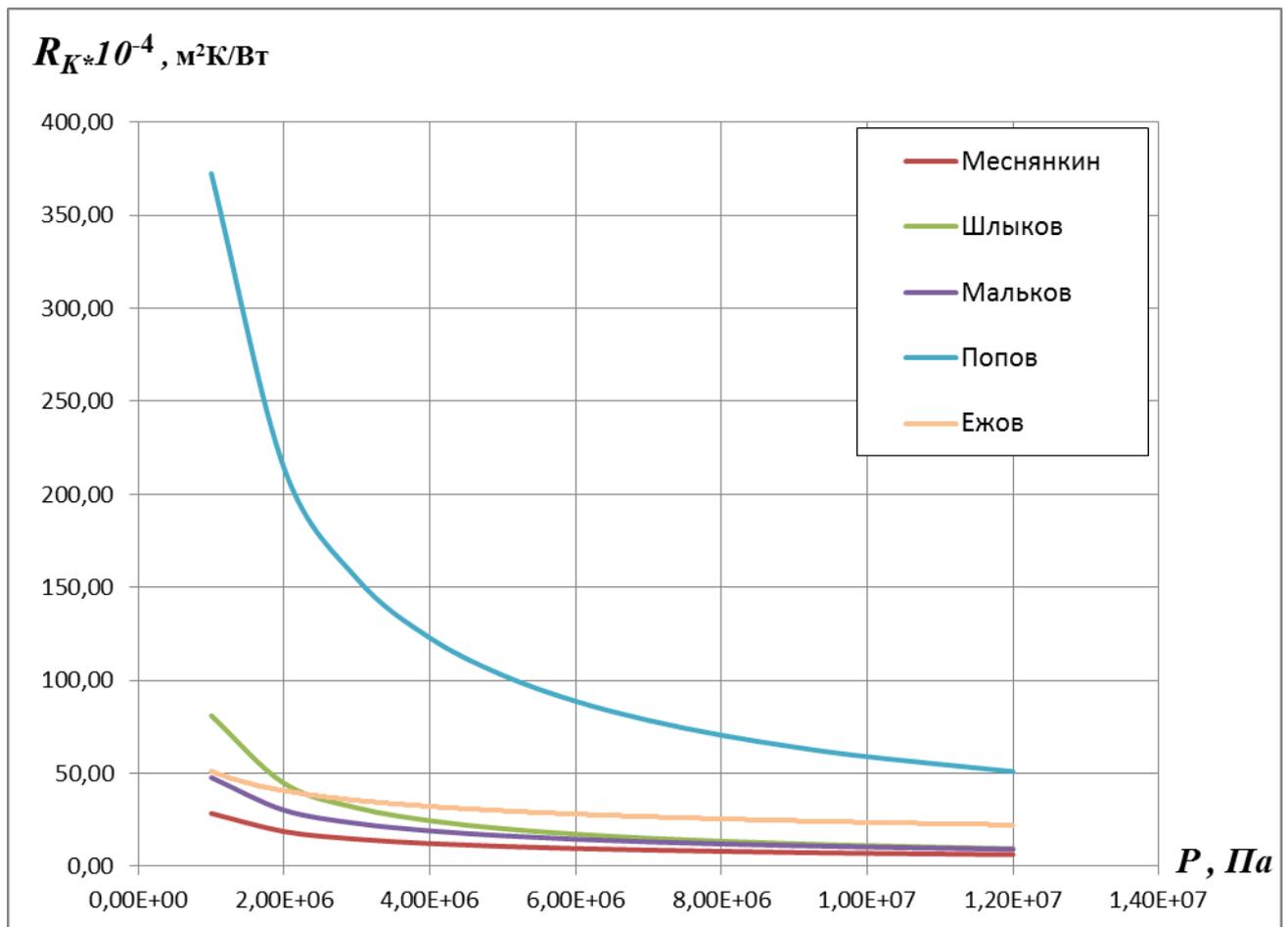


Рис.7. Графики зависимостей КТС от давления.

Видно, что полученные результаты удовлетворительно коррелируют со сложными аналитическими зависимостями большинства авторов (за исключением данных В.М. Попова). Следует отметить, что приведенный расчет производился по среднестатистическим величинам шага неровности шероховатой поверхности для рассматриваемых классов чистоты поверхностей. Знание реальной профилограммы контактирующих поверхностей существенно снизит ошибку при расчете КТС.

Выводы

Представленная методика определения КТС позволяет найти его значения между парами различных материалов, используемых в авиационной и ракетно-космической отрасли. Результаты расчетов и сравнений с известными зависимостями показали, что используемый метод адекватен, а его применение не требует специфических знаний о состоянии контактирующих поверхностей.

Библиографический список

1. Мальков В.А., Фаворский О.Н., Леонтьев В.Н. Контактный теплообмен в газотурбинных двигателях и энергоустановках. - М.: Машиностроение, 1978. - 138с.
2. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 277 с.
3. Витенберг Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. - Л.: Судостроение, 1971. -108 с.
4. Nayak P.R. Random Process Model of Rough Surfaces // Journal of Lubrication Technology, July "Elsevier", 1971. p. 398-407.
5. Семенюк Н.Ф. Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля. // Трение и износ. 1980. Т.1. № 6. С. 1010 - 1020.
6. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей, теоретико-вероятностный подход. - М.: Наука, 1971. - 340 с.

7. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова, Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учебное пособие. - Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. - 271с.
8. Меснянкин С.Ю., Ежов А.Д., Басов А.А. Определение контактного термического сопротивления на базе трехмерного моделирования соприкасающихся поверхностей // Известия РАН. Энергетика. 2014. № 5. С. 65-74.
9. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление - М.: Энергия, 1977. 327 с.
10. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. - М.: Энергия, 1971. -216 с.