

УДК 536.241

Расчет термического сопротивления контакта элементов энергетических установок с волнистыми поверхностями

Меснянкин С.Ю.*, Диков А.В.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: heat@mai.ru*

***e-mail: art-dikov@yandex.ru*

Аннотация

Рассматривается важная задача по определению закономерностей теплообмена в конструктивных элементах современных энергетических установок. Предложен численный метод определения термического сопротивления контакта волнистых поверхностей на базе программного комплекса ANSYS, когда сначала решается механическая задача, а в дальнейшем и тепловая, в ходе которой определяется перепад температур в контактной зоне. Хорошее совпадение численных расчетов с известными результатами позволяет его рекомендовать для широкого применения.

Ключевые слова: волнистые поверхности, тепловое контактирование, термическое сопротивление, модельные элементы.

Введение

При проектировании энергетических установок космического назначения повышенное внимание уделяется точности тепловых расчетов.

Анализ реальных конструкций элементов термостабилизации показал, что наиболее типичными поверхностями теплоотвода являются плоские поверхности с макроотклонениями в виде волн. Тепловое контактирование поверхностей с волнистостью имеет ряд особенностей и недостаточно изучено к настоящему времени. Основное внимание всегда уделялось механике контактного взаимодействия, а тепловые процессы из-за сложности решения задачи и меньшей востребованности оставались в стороне.

В связи с широким развитием в настоящее время программного комплекса конечно-элементных расчётов ANSYS в тепловых и прочностных задачах [1, 2] предложен метод, базирующийся на последовательном решении механической задачи, а затем поэлементном анализе прохождения теплового потока, что позволяет определить термическое сопротивление контакта волнистых поверхностей.

Моделирование волнисто-шероховатой поверхности

Анализируя реальные поверхности становится очевидно, что распределение выступов по высоте необходимо описывать функцией Гаусса [3]. Для реализации этого подхода воспользуемся работой [4], где представлен метод, позволяющий построить поверхность, соответствующую заданному закону распределения, что дает возможность смоделировать элементы, у которых распределение материала в

поверхностном слое соответствует нормальному закону и приближает модельные элементы к реальным поверхностям. Данным методом для поверхности с определенным классом шероховатости и волнистости вначале строится модель, соответствующая заданному классу шероховатости (рис.1а), затем находится закономерность необходимого класса волнистости (рис.1б).

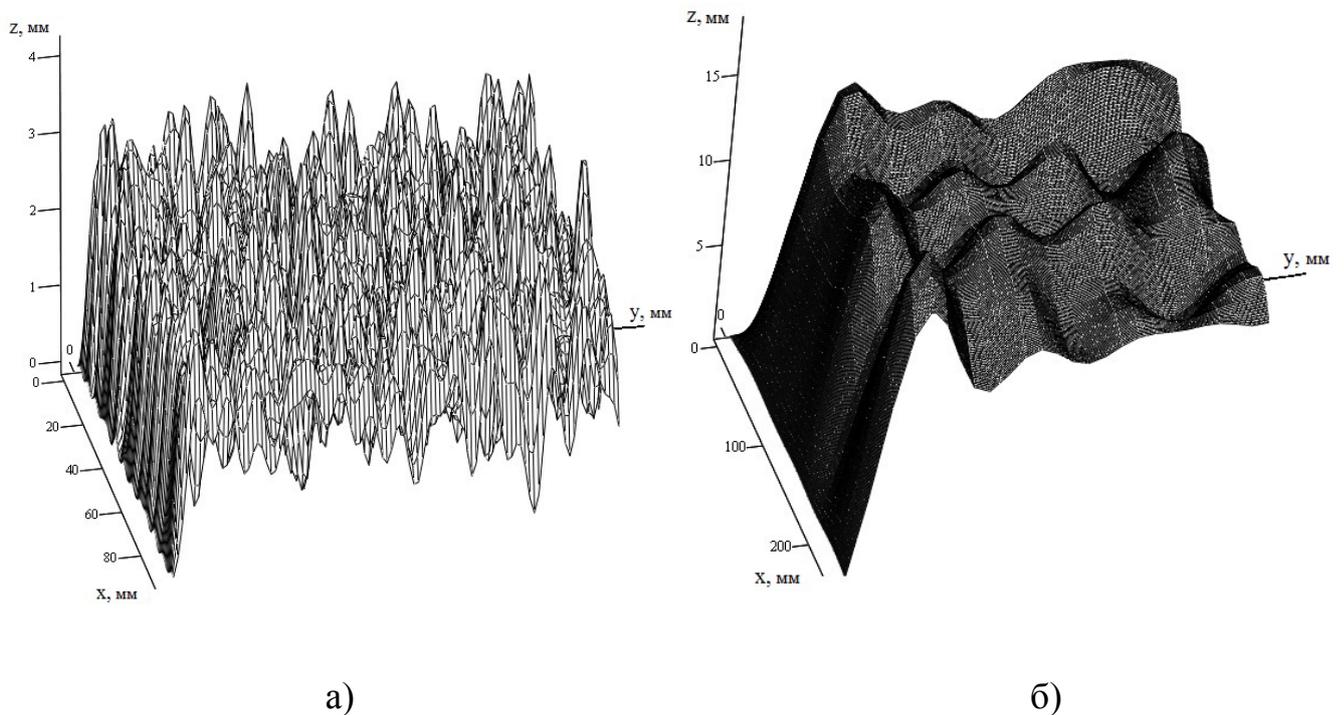


Рис.1 Модельное представление: а)- шероховатость; б)- волнистость

При моделировании шероховатости математическое ожидание принималось равным средней высоте неровности [3], а среднее квадратическое отклонение профиля выбиралось по соответствующему среднему арифметическому отклонению [5]. Для моделирования волнистости математическое ожидание принималось равным средней высоте волны, а среднее квадратическое отклонение профиля в

связи с отсутствием стандартизированных справочных данных, необходимых для точного описания геометрических параметров волнистой поверхности, для удобства принималось равным единице. В дальнейшем производится чисто механическое наложение на смоделированные волны полученной шероховатости. Для точек, имеющих одинаковые координаты x и y , суммируется координата высоты z этих двух поверхностей. В результате получается механическая модель волнистой шероховатой поверхности с заданной шероховатостью, общий вид которой приведен на рисунке 2.

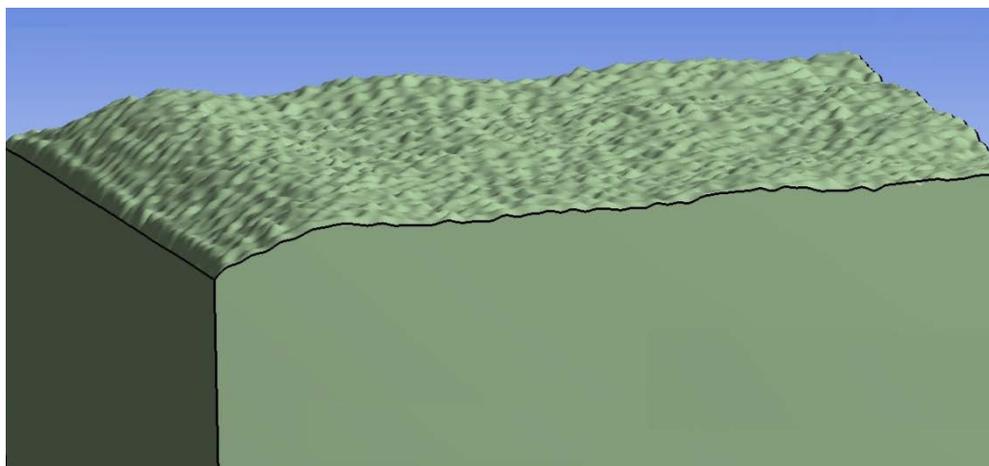


Рис.2 Объемное отображение модели волнистой и шероховатой поверхности

Методика расчета контактного термического сопротивления

Для расчета контактного термического сопротивления модельных элементов используется метод, хорошо себя зарекомендовавший при расчете контактного термического сопротивления шероховатых поверхностей и подробно описанный в публикации авторов [6]. В данном случае также последовательно решается сначала

прочностная, а затем тепловая задача. Решение данных задач выполнено в программном комплексе конечно-элементных расчетов ANSYS.

В ходе решения прочностной задачи с учетом последних достижений механики контактного взаимодействия определяется фактическая площадь соприкасающихся поверхностей, когда по известным свойствам контактирующих материалов и прилагаемой удельной нагрузке рассчитывается деформация модели. В дальнейшем решается тепловая задача применительно к геометрической модели, полученной по результатам решения прочностной. По известным величинам плотности теплового потока, теплопроводности и температуре одной из поверхностей определяется поле температуры в рассматриваемых элементах. В отличие от расчета пятен контакта шероховатых поверхностей [6] в данной постановке происходит двойное стягивание линий теплового потока вначале к контурной площади, образованной за счет контакта волн, а затем к фактической площади, образованной за счет контакта выступов шероховатости. При этом наибольший вклад в суммарное контактное термическое сопротивление вносит стягивание линий теплового потока к контурным площадям контакта волн.

Величина контактного термического сопротивления определяется как отношение перепада температур, обусловленного стягиванием линий теплового потока к контактными пятнами, к средней величине плотности теплового потока. Для этого тепловой расчёт в контактных элементах выполняется дважды. Сначала для анализируемой контактной пары, что позволяет определить температуру на холодной поверхности рассматриваемой модели. А затем для сплошной модели,

состоящей из прямых соосных цилиндров, контактирующих по плоской торцевой поверхности. Этот расчёт позволяет найти температуру, которая была бы при так называемом идеальном контакте. Далее сопоставляются распределения температур на двух моделях- с реальным контактом (рис. 3а) и идеальным (рис. 3б).

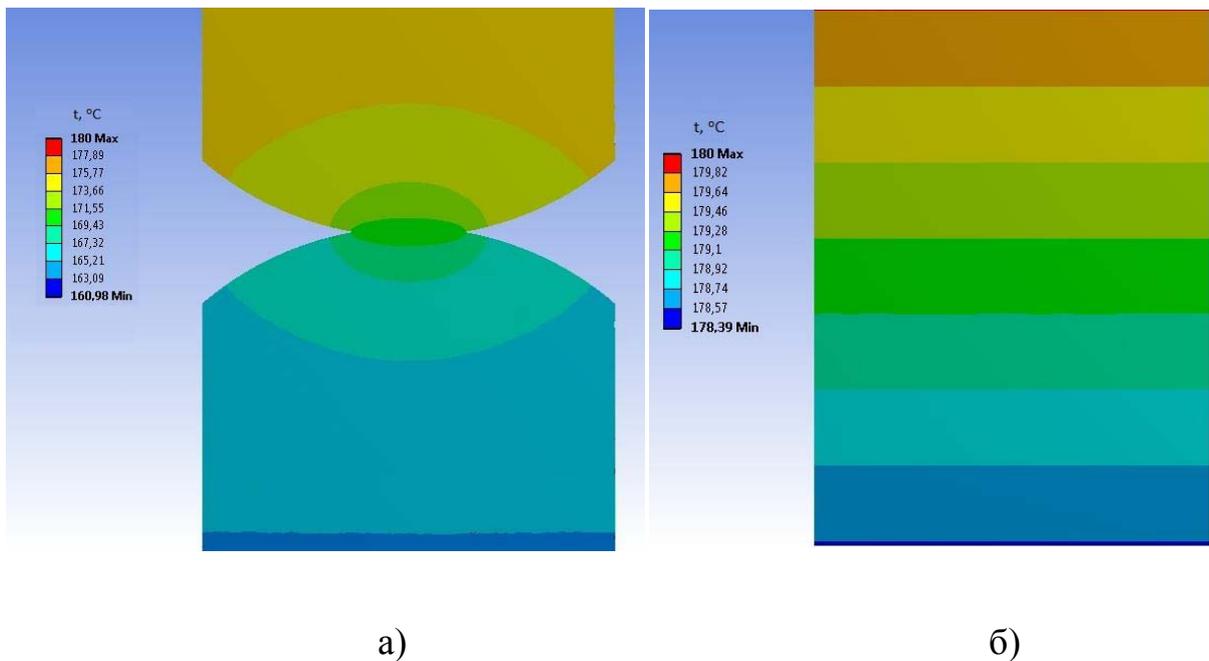


Рис.3 Поля температуры в моделях реального (а) и идеального (б) контакта.

При этом величина контактного термического сопротивления $R_{k,a}$ определяется из формулы:

$$R_{k,a} = (T_0 - T) / q, \quad (1)$$

где T и T_0 - температуры холодных нижних поверхностей реального и идеального контактов соответственно, q - средняя величина плотности теплового потока.

Применительно к рассматриваемому примеру:

$$R_{k,a} = \frac{(178,39K - 160,98K)}{10^5 \frac{Вт}{м^2}} = 1,74 \cdot 10^{-4} \frac{2}{Вт}$$

Предложенная методика позволяет определить места расположения пятен контакта, а также точно рассчитать поля напряжений и температур вблизи каждого из пятен контакта. Результаты расчетов позволяют определить не только $R_{k,a}$, но и область, на которую начинает оказывать влияние сужение проходного сечения.

Сопоставление результатов расчета с известными данными

Для проверки достоверности предложенной модели и правомерности использования предлагаемых расчётов в практических задачах выполнено сопоставление $R_{k,a}$ с экспериментальными данными [7] для контактной пары из нержавеющей стали X18Н9Т при температуре в зоне контакта $T_k = 443K$ со следующими характеристиками обработки поверхностей $\nabla 9в$, нижний образец в которой волнистый, а верхний только шероховатый. При этом класс шероховатости $\nabla 8б$ соответствует стандартным параметрам со средним арифметическим отклонением профиля $Ra = 0,5$ мкм, а $\nabla 9в$ соответствует $Ra = 0,21$ мкм. Волнистость характеризуется верхним пределом высоты волны, который для V класса волнистости составляет $H_v = 16$ мкм. Общий вид модели данной контактной пары представлен на рисунке 4.

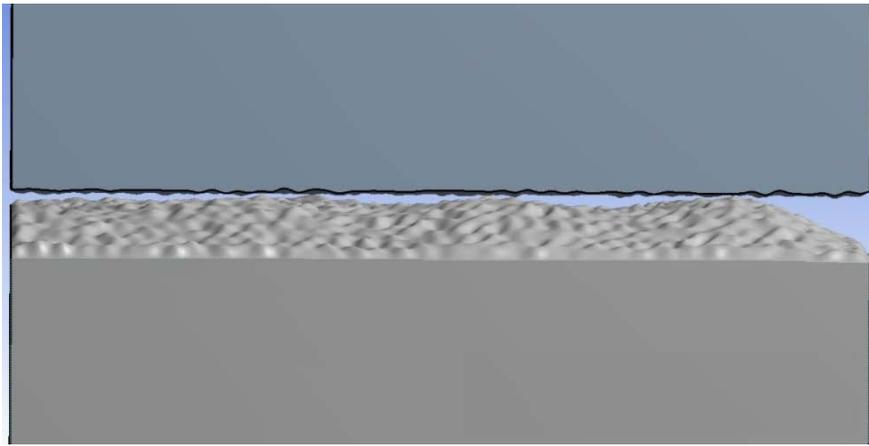


Рис. 4. Общий вид модели для рассматриваемой контактной пары.

Фактическая площадь контакта с конкретизацией размеров пятен контакта двух указанных образцов для случая, когда удельная нагрузка составляет 5 МПа, представлена на рисунке 5.

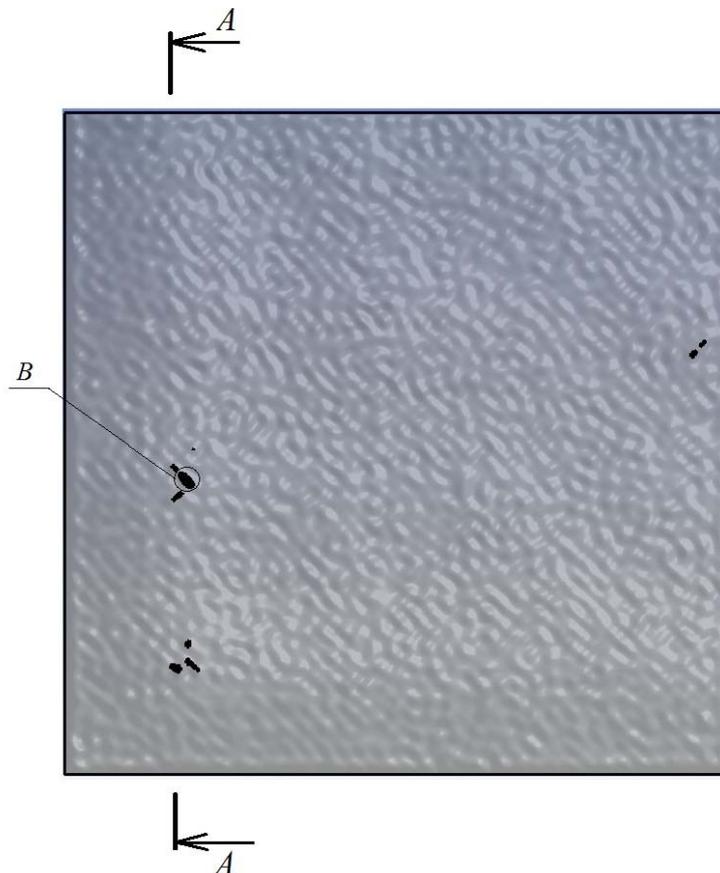


Рис. 5. Места расположения пятен контакта.

Трехмерное распределение напряжений, являющееся основой для тепловых расчетов, а также позволяющее решить чисто прочностную задачу, для рассматриваемого случая вблизи пятна контакта В (рис.5) представлено на рисунке 6.

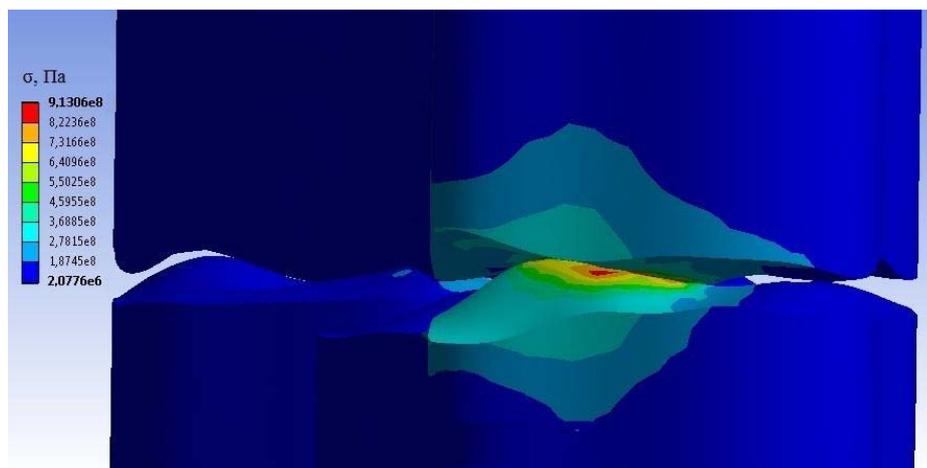


Рис.6. Трехмерное распределение напряжений вблизи пятна контакта.

Из приведенных данных отчетливо видно, что волнистые поверхности соприкасаются при небольшой нагрузке в отдельных незначительных пятнах (рис. 4), площадь которых составляет сотую часть от номинальной. Распределение температуры в сечении *A-A* (см. рис. 5), позволяющее определить не только величину контактного термического сопротивления, но и область, в которой происходит явление стягивания линий теплового потока, возникающее за счет сужения проходного сечения при контакте волнистой поверхности с плоской, показано на рисунке 7. Применительно к рассматриваемому случаю контактное термическое сопротивление, рассчитываемое по формуле (1) будет равно $R_{k,a}=2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2\text{К Вт}^{-1}$.

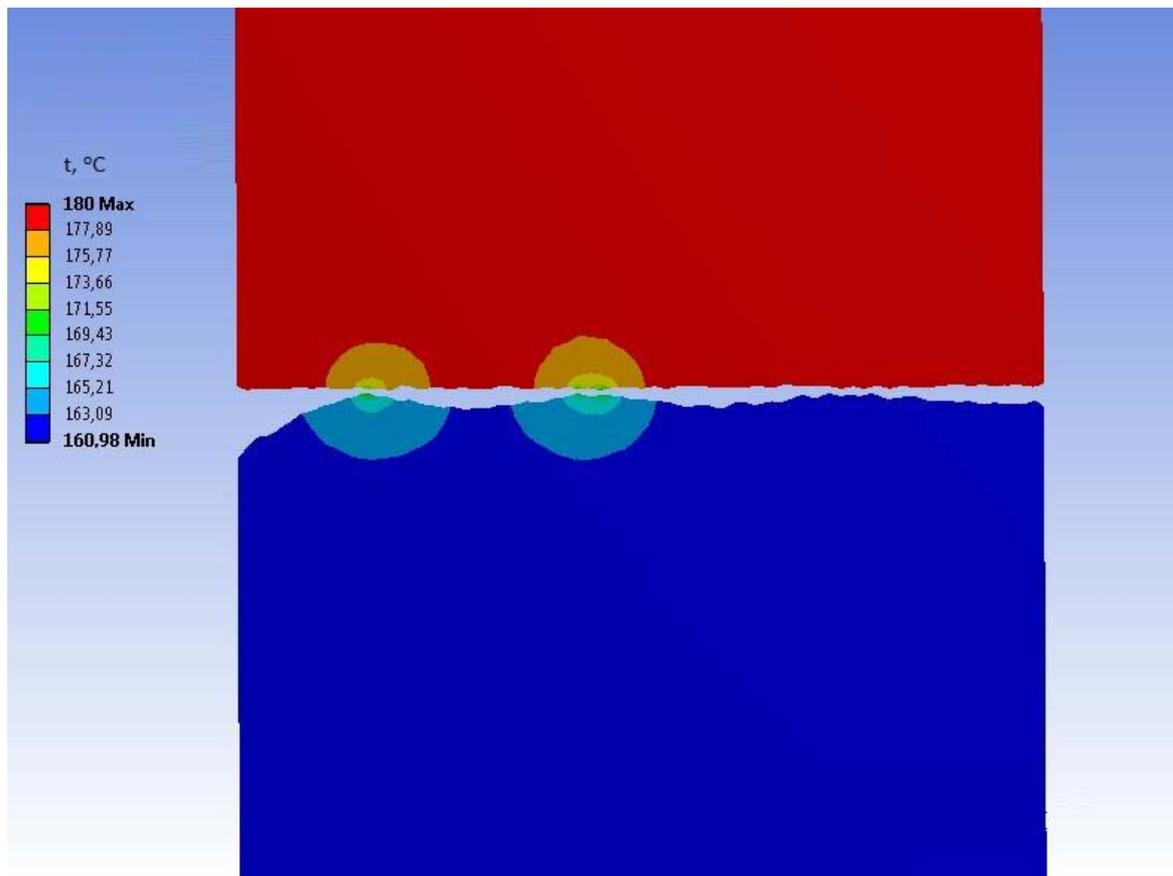


Рис. 7. Поле температуры вблизи пятен контакта.

Для проверки достоверности полученных результатов выполнено сопоставление с данными работ [7,8], в которых приведены не только экспериментальные, но и аналитические величины R_k , полученные по результатам обобщения многочисленных экспериментальных данных формулой:

$$\frac{1}{R_k} = 2,12 \bar{\lambda}_m \left(\frac{q_k}{E} A \right)^{0,8} \frac{\eta}{\varphi}, \quad (2)$$

где $\bar{\lambda}_m$ - приведенная теплопроводность контактирующих материалов, Вт/м К; q_k - контурное давление, Па; E - модуль Юнга, Па; A - коэффициент, зависящий от суммарных значений средних высот выступов микронеровностей; φ - коэффициент стягивания линий теплового потока; η - относительная площадь контакта.

Формула несложная, но воспользоваться ей очень трудно, так как входящие в нее величины требуют специальных методик определения.

Результаты сопоставления расчётного $R_{k,a}$, экспериментального $R_{k,эксп}$ и аналитического R_k для рассматриваемой контактной пары из нержавеющей стали приведены на рисунке 8.

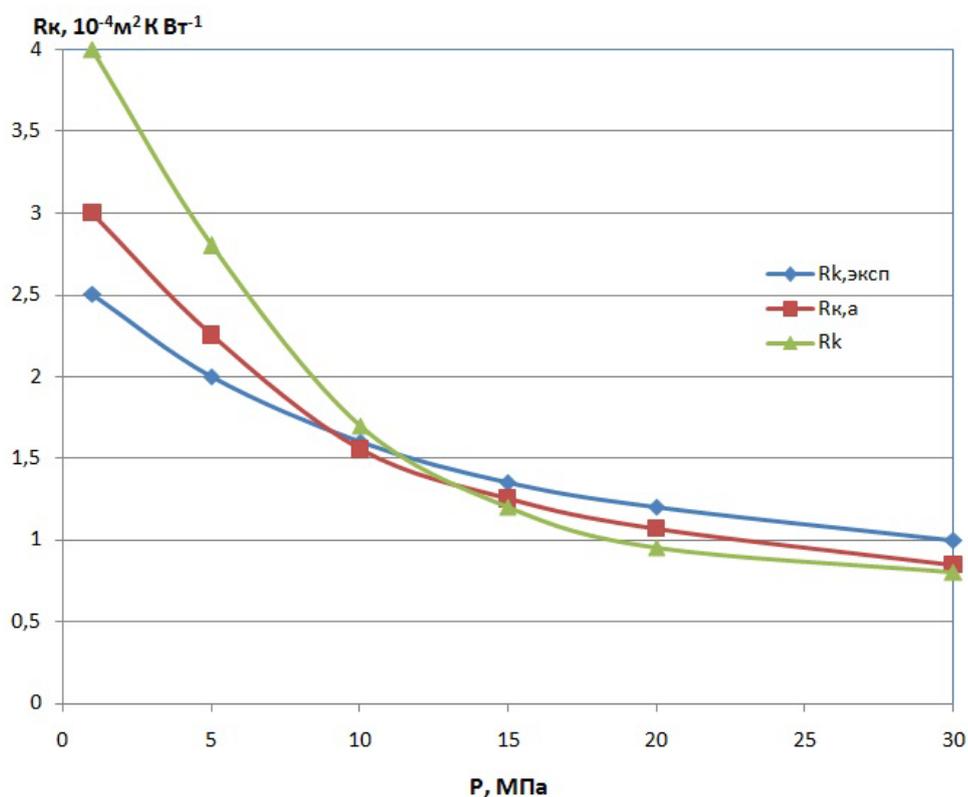


Рис.8. Сопоставление значений контактного термического сопротивления для нержавеющей стали ($R_{k,a}$ - данная работа, $R_{k,эксп}$ - экспериментальные данные [7], R_k - аналитическое значение, рассчитанное по формуле (2)).

Из графика видно, что расчетные значения, полученные численным методом, гораздо ближе к экспериментальным, особенно в области малых контактных нагрузок.

С целью расширения круга материалов и условий их контактирования предложенным методом смоделированы элементы и выполнены расчёты контактного термического сопротивления, которые в дальнейшем сопоставлены с экспериментальными данными [8] и результатами расчета по той же формуле (2) для разнородной контактной пары Д16Т- сталь 45 со следующими характеристиками обработки поверхностей $\frac{VII}{\nabla 66}$ и температурой в зоне контакта $T_k=383$ К. В данном случае волнистая поверхность из дюралюминия имела высоту волны $H_w=64$ мкм, соответствующей VII классу волнистости, и среднее арифметическое отклонение $Ra=2,1$ мкм, соответствующее шестому классу шероховатости, участвует в тепловом контакте с шероховатой поверхностью из стали 45, обработанной также по шестому классу шероховатости.

Сравнение результатов в зависимости от нагрузки представлены на рисунке 9.

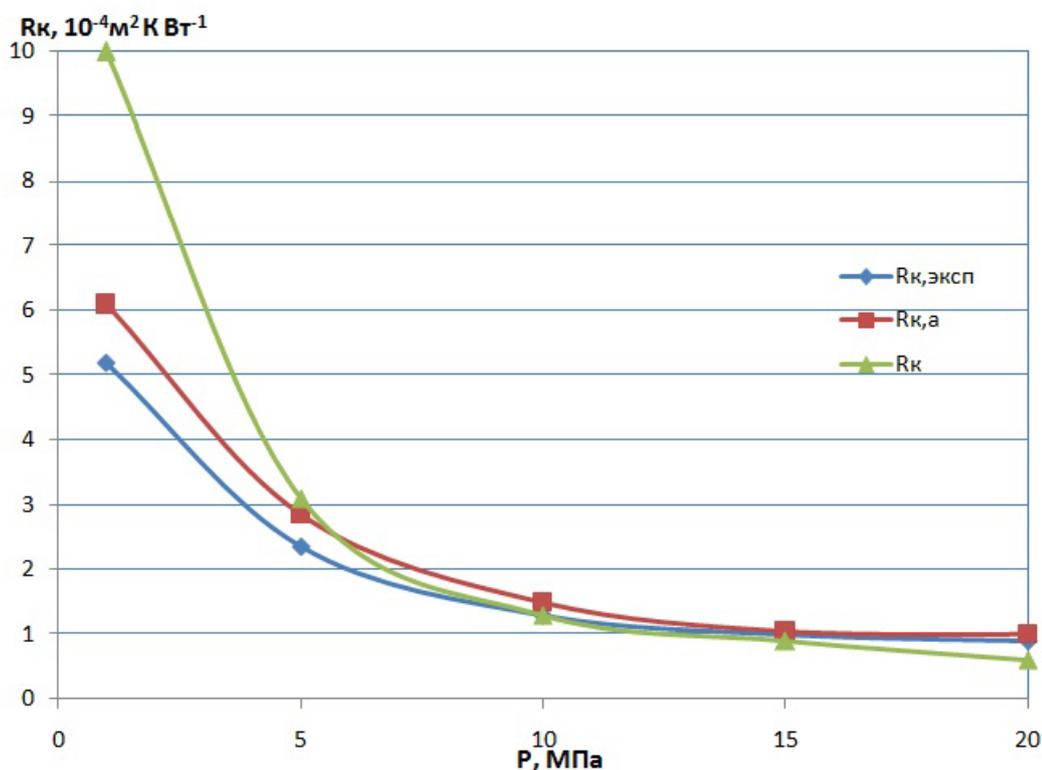


Рис.9. Сопоставление значений контактного термического сопротивления для контактной пары Д16Т- сталь 45 ($R_{k,a}$ - данная работа, $R_{k,эксп}$ - экспериментальные данные [8], R_k - аналитическое значение, рассчитанное по формуле (2).

Здесь также видно более близкое совпадение предложенного метода с экспериментом.

Приведенные результаты свидетельствуют о правомерном использовании предлагаемого численного расчёта контактных термических сопротивлений волнистых поверхностей в реальных задачах.

Выводы

С целью повышения точности определения контактного термического сопротивления волнистых поверхностей предложен численный метод, реализованный на сложных моделях реальных сопряжений с шероховатостью и показавший удачную сходимость с частными методиками и известными экспериментами.

Библиографический список

1. Анিকেев А.А., Молчанов А.М., Янышев Д.С. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики: Учебное пособие. - М.: Книжный дом "Либроком", 2010. - 152 с.

2. Молчанов А.М., Щербаков М.А., Янышев Д.С., Куприков М.Ю., Быков Л.В. Построение сеток в задачах авиационной и космической техники: Учебное пособие. - Калуга: Издательство "Эйдос", 2013. - 262 с.
3. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с.
4. Войнов К.Н., Ходаковский В.А., Шварц М.А. Математическое моделирование шероховатых поверхностей // Трение, износ, смазка. 2009. Т.12. №41. С. 1-9.
5. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.
6. Меснянкин С.Ю., Диков А.В. Численный расчет теплового контактирования твердых тел. От моделей до реальных поверхностей // Тепловые процессы в технике. 2014. Т.6. №5. С. 230- 235.
7. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъёмных и неразъёмных соединений. - М.: Энергия, 1971. - 216 с.
8. Попов В.М., Лазарев М.С. К вопросу определения термического сопротивления контакта систем с волнистыми поверхностями // Инженерно- физический журнал. 1971. Т.XX. №5. С. 846- 851.