

УДК 536.2

Обзор влияния различных параметров на контактную теплопередачу

Х. Абдоллахи¹, С. Шахраки¹, М. Мотахари-Нежад²

¹*Университет Заболя, Заболь, Иран*

²*Исламский университет Азад, Тегеран, Иран*

E-mail: mmotaharinezhad@gmail.com

В статье представлен обзор литературы по тепловым контактам между неподвижными и периодически контактирующими поверхностями, а также между выпускным клапаном и его гнездом в двигателях внутреннего сгорания. Кроме того, выполнен анализ влияния ряда параметров, таких как контактное давление, частота контактов, рельеф и шероховатость контактирующих поверхностей, радиус кривизны поверхностей, циклы разгрузки-загрузки, теплопроводность и свойства газового разрыва, свойства материала, поглощенного поверхностью раздела, величина покрытия поверхности, а также влияния поверхностных температур на контактную теплопроводность по доступным литературным источникам. Настоящий обзор охватывает теоретические, аналитические, экспериментальные и численные исследования контактной теплопроводности. Для изучения теплового контакта между выпускным клапаном и его гнездом в большинстве экспериментов исследуются два осевых стержня; один из концов этих стержней рассматривается при постоянной и различных температурах. Контактная теплопроводность в экспериментах определяется путем измерения температуры стержней в нескольких точках при разных условиях.

Ключевые слова: контактная теплопередача, контактная теплопроводность, экспериментальная установка, численное решение.

Введение

Передача тепла теплопроводностью в однородных и изотропных материалах впервые была представлена Фурье в 1822 году, однако в области контактной передачи тепла до работ Хольма и Росса, опубликованных в 1929 и 1948 годах, было проведено мало исследований. При этом для формирования более надежных и долговечных компонентов возрасла необходимость определения и контроля скорости передачи тепла в контактирующих поверхностях (Auer, 2003).

Множество экспериментальных и теоретических исследований проводилось в области контактной теплопередачи и особенно теплового контакта между шероховатыми поверхностями. Одну из самых известных моделей контактного теплообмена ввели (Cooper et al., 1969; Mikic, 1971). Эта модель, имеющая обозначение СМУ, используется для изотропных поверхностей при пластической деформации. На основе модели СМУ (Mikic, 1974) были разработаны другие модели, такие как модель Микича и Йовановича. Sridhar, Yovanovich (1994) изучалось поведение многих широко используемых при тепловом контакте моделей. Было проведено сравнение имеющихся данных различных моделей с многочисленными экспериментальными данными и сделан вывод, что модели, разработанные на основе СМУ, являются более простыми и точными, особенно при высоких

относительных давлениях межфазовой границы раздела. Однако такие модели при низком давлении показывают менее точные результаты, чем экспериментальные данные. Модель СМУ и другие модели предполагают высокое распределение шероховатости по Гауссу. Milanez, Yovanovich, Mantelli (2003) показали, что это допущение приемлемо только в некоторой области. В большинстве случаев самая высокая шероховатость меньше ожидаемой. Как следствие, среднее значение разрыва при низких давлениях оказывается ниже ожидаемого. Таким образом, тепловой контакт получается выше ожидаемого, и с увеличением давления все больше шероховатостей становятся контактирующими. В результате Гауссова модель имеет большую точность при высоких давлениях (Milanez, Yovanovich, Culham, 2003).

В работе (Savija, Yovanovich et al., 2003) была представлена модель для прогнозирования контактной теплопроводности (КТ) и сопротивления термического контакта (СТК) на шероховатой поверхности при пластической деформации. Эта модель применима в случае, когда теплопроводность материалов является низкой ($K < 50$ (Вт/мК)), на межфазной поверхности жидкость имеет высокую теплопроводность ($K < 1$ (Вт/мК)), давление на межфазной поверхности низкое ($P < 0,3$ МПа) и контактные поверхности относительно гладкие.

Оценка теплового контакта имеет решающее значение в криогенных системах, особенно при сверхнизких температурах, где теплоемкость хладагента является низкой из-за малой теплопроводности. Многие работы посвящены изучению теплового контакта на стыках шероховатых поверхностей в условиях низких температур, включая близкие к абсолютному нулю (Berman, Mate, 1958; Berman, 1956; Woodcraft, 2001; Pobell, 1992; Lau, Zimmermann, 1979; Deutsch, 1979; Manninen, Zimmermann, 1977; Corbett et al., 1994; Didschuns et al., 2004). Основная часть исследований по контактной передаче тепла от выпускного клапана и его гнезда в двигателях внутреннего сгорания была проведена в 1970-е годы. В большинстве из них сравнивались результаты, полученные различными методами, и соответственно анализировалась точность этих методов. Теоретическим исследованием определения скорости теплового потока на контактной поверхности с такими допущениями, как гладкость поверхности, низкая частота контактов и квазистационарный периодический контакт, были посвящены работы (Howard, 1975; Howard, Sutton, 1970; Howard, Sutton, 1973). Прогнозирование интенсивности теплопередачи между выпускным клапаном и его гнездом экспериментально исследовалось Ozisik, Orlande (2000). Лабораторная установка для экспериментальных исследований теплового контакта между выпускным клапаном и его гнездом состоит по сути из двух коаксиальных стержней, неконтактирующие концы которых имеют постоянную температуру. При наличии изоляции вокруг стержней процесс передачи тепла через сечение стержня является одномерным.

1. Обзор предыдущих исследований

Чтобы оценить состояние дел в области контактной передачи тепла, необходимо обратиться к уже имеющимся обзорным работам. В таблице перечислены существующие по этой теме публикации.

Таблица
Ссылки на обзорные статьи, связанные с контактной передачей тепла

Изученные случаи	Области	Ссылка/автор
1	2	3
Теоретические, аналитические и численные исследования теплопроводности для взаимосвязанных или других контактирующих поверхностей: контактная теплопередача в контактирующих поверхностях новейших и современных материалов, в микроэлектронике и биомедицине; исследование охватывает термическую ректификацию, газовую проводимость, цилиндрические контакты, периодические и скользящие контакты и измерения проводимости.	Последние разработки в контактной теплопроводности.	Fletcher (1988)

1	2	3
Представлены возможные покрытия для улучшения контактной теплопроводности, полученные с помощью существующих теорий контактной теплопередачи в соединениях с покрытием.	Контактная теплопроводность в соединениях с металлическими покрытиями и пленками.	Lambert, Fletcher (1993)
Оценивается сопротивление одиночного сужения, теплового сопротивления нескольких контактных пятен в вакууме и соотношения для контактной теплопроводности в вакууме, даются рекомендации для дальнейшей работы.	Контактная теплопередача.	Madhusudana, Fletcher (1985)
Представлен полный обзор аналитических и экспериментальных моделей для определения контактной теплопроводности между механическими соединениями; дана ретроспектива методов моделирования теплового контакта на неизолированной контактирующей поверхности, шероховатой контактирующей поверхности, выполненных на материалах, способствующих тепловому контакту, таких как металлическая фольга, совместимые полимерные материалы, пленки и покрытия.	Модели тепловой проводимости для соединений, включающих усовершенствованные материалы.	Savija, Culham et al. (2003)
Приведен обзор исследований, проводившихся в последние 40 лет и посвященных стационарной и нестационарной проводимости и сопротивлению тепловых контактов, термомеханическим моделям контактов, разрывам и соединениям, образованным контактирующими шероховатыми поверхностями, а также неконтактирующими гладкими поверхностями и неконтактирующими шероховатыми поверхностями.	Тепловой контакт, разрыв и сопротивление соединения в микроэлектронике.	Yovanovich, (2005)
Впервые представлена безразмерная модель теплового контакта на основе данных для четырех различных материалов при упругой и пластической деформации.	Модели упругой и пластической контактной проводимости.	Sridhar, Yovanovich (1994)

На основании перечисленных работ можно сделать вывод, что существует далеко не полный обзор по контактной теплопроводности между выпускным клапаном и его гнездом. Кроме того, не было полностью изучено влияние различных параметров на тепловой контакт. В настоящей работе исследуется тепловой контакт между выпускным клапаном и его гнездом и влияние различных параметров на контактную теплопроводность.

2. Теплопередача между неподвижными контактирующими поверхностями

Изучение теплового контакта между контактирующими поверхностями проводилось теоретически, экспериментально и численно. Ниже приводится обзор исследований теплообмена между неподвижными контактными поверхностями.

2.1. Экспериментальные исследования

Процесс контактной теплопередачи из-за его сложности большинством исследователей изучался экспериментально. Сопротивление теплового контакта между двумя неподвижными контактирующими поверхностями, а также влияние на него температуры и давления были проверены в опыте (Khandelwal, Mench, 2006). В работе Georges et al., (2009) было изучено сопротивление теплового контакта на контактирующих точках электродов в процессе Холла–Херуа. Контактная теплопередача между двумя неподвижными контактирующими поверхностями в переходном режиме исследовалась Fieberg, Kneer (2008) и Luo et al. (2011).

Из результатов экспериментов с переходным режимом стало ясно, что контактная теплопроводность не является постоянной на начальных этапах процесса, но резко возрастает от нуля до определенного значения, а затем остается почти стабильной. Изменение контактной теплопроводности от нуля до установившегося распределения температуры для двух одинаковых образцов латунь–латунь показано на рис. 1 (Takahashi, Fujiwara, 2001).

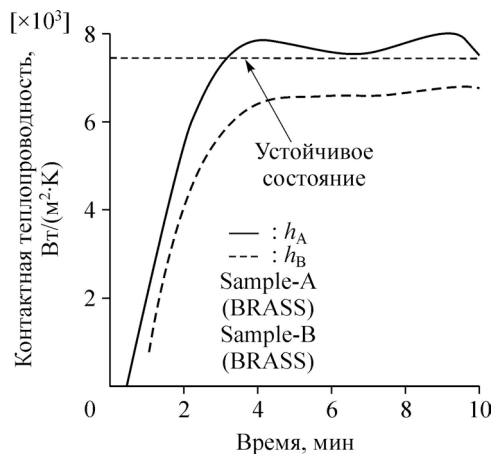


Рис. 1. Изменение контактной теплопроводности в зависимости от времени (Takahashi, Fujiwara, 2001).

Обозначения см. в работе (Takahashi, Fujiwara, 2001).

2.2. Аналитические и численные исследования

Cengel, Turner (2001) предложили прогностическую модель для оценки коэффициента теплопередачи между двумя шероховатыми металлическими пластинами и воспользовались экспериментальными данными для ее подтверждения. Эта модель состоит из двух частей, дополняющих друг друга. Первая часть включает анализ деформации поверхности при измерении фактической поверхности контакта для каждой его точки. Вторая часть рассматривает эффекты сопротивления сжатию и теплопроводности газов в пределах контактирующих поверхностей.

2.3. Теплопередача между периодически контактирующими поверхностями

Экспериментальные, аналитические и численные исследования периодически контактирующих поверхностей представлены в нижеследующих разделах.

2.3.1. Экспериментальные исследования

В работе (Moses, Johnson, 1988) экспериментально исследовался нестационарный теплообмен между двумя плоскими поверхностями с периодическим контактом. Экспериментальная модель состояла из двух стержней, один конец которых находился в контакте, а другой конец постоянно нагревался. Для удержания стержней и предотвращения их деформации использовались каркас и соответствующее оборудование. Верхний стержень был неподвижен, в то время как нижний мог периодически двигаться под действием пневматической силы. Кроме того, чтобы свести к минимуму потери тепла, стороны стержней были изолированы. Для получения распределения температуры использовалось несколько термопар. Чтобы получить распределение температуры на контактных поверхностях, применялся метод экстраполяции. В дальнейшем авторы этой работы также изучали квазистационарный теплообмен между двумя периодически контактирующими поверхностями. Они исследовали влияние временных интервалов и контактных циклов на квазистационарное распределение температуры на поверхности (Moses, Johnson, 1989). В работе (Moses, Dadd, 1990) был проведен эксперимент для исследования передачи тепла между двумя соприкасающимися поверхностями, где изучалось влияние количества измерений, их места и т.д. на точность результатов. Rosochowska et al. (2004) представили новый экспериментальный метод измерения контактной теплопроводности. Он основан на предположении о равномерности теплового потока между различными компонентами. Эксперименты проводились при нормальном давлении. Температура поверхности в исследовании экстраполировалась с помощью температуры, измеренной термопарами.

Попов и др., (2008) установили контактную теплопередачу между периодически контактирующими поверхностями, используя аналитические лабораторные результаты. Результаты исследования показали, что общее термосопротивление зависит от таких факторов,

как тепловое сопротивление контактирующих материалов, температура контактирующих поверхностей, контактное давление, геометрия контактирующих поверхностей и контактный период.

2.3.2. Аналитические и численные исследования

В работе (Flach, Ozisik, 1988) рассматривалась обратная задача теплопроводности для определения теплоемкости периодического теплового контакта между двумя поверхностями, а в работе (Orlande, Ozisik, 1993) был представлен метод сопряженных градиентов с сопряженным уравнением для решения обратной задачи теплового контакта между двумя периодически контактирующими поверхностями. Chen, Tuan (2002) оценили численно коэффициент теплопроводности соприкасающихся поверхностей с помощью обратного онлайн-метода, основанного на входном статистическом методе оценки. Для сравнения результатов был использован метод сопряженных градиентов. Результаты показали, что обратное решение имеет высокую сходимость и точность. В работе (Fan, Barber, 2002) был представлен новый метод решения задачи теплообмена с помощью матрицы преобразований и предложен способ получения необходимой матрицы, а также приведен пример для обсуждения этих задач. В работе (Zhao et al., 2005) было проведено статистическое исследование для оценки контактной теплопередачи с учетом поверхностной шероховатости и изучена контактная теплопередача для различных профилей шероховатости.

3. Теплообмен между выпускным клапаном и его гнездом в двигателе внутреннего сгорания

Существует множество исследований контактной теплопередачи между выпускным клапаном и его гнездом (Goudarzi et al., 2008; Shojaeefard et al., 2005; Shojaeefard et al., 2009; Shojaeefard et al., 2013; Shojaeefard et al., 2015). В настоящем разделе рассмотрены исследования контактной теплопередачи между выпускным клапаном и его гнездом в двигателях внутреннего сгорания. Большинство экспериментальных установок, применяемых при изучении термического контакта между выпускным клапаном и гнездом, включает два одномерных стержня, свободные концы которых имеют постоянную температуру. Благодаря изоляции вокруг стержней теплообмен, возникающий вследствие

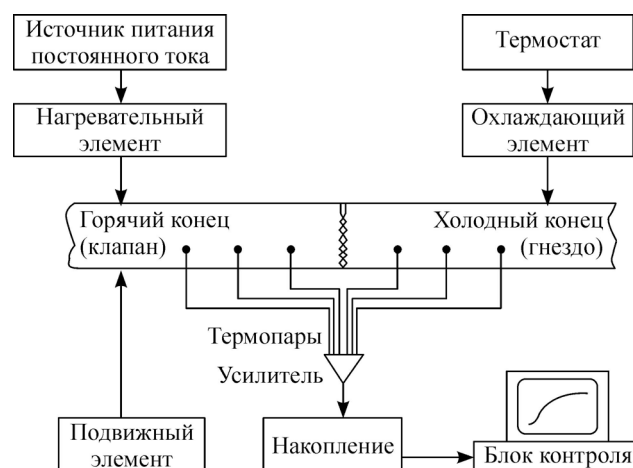


Рис. 2. Использование двух одномерных стержней как выпускного клапана и гнезда (Shojaeefard, Ghaffarpour, Noorpoor, 2008).

излучения, является незначительным и, следовательно, задачу переноса тепла можно рассматривать в одномерной постановке (рис. 2). В работе (Howard, Sutton, 1973) были найдены аналитические решения для контактной теплопередачи и между периодически контактирующими стержнями, клапанами и гнездами. Здесь же исследовалось влияние частоты и продолжительности контакта клапана и гнезда на интенсивность теплообмена. Howard (1975) обнаружил, что в реальности контактная теплопроводность не является одинаковой даже при одном и том же давлении.

В последнее время было проведено несколько исследований реальной геометрии выпускного клапана и его гнезда для оценки контактного теплообмена между ними. Cowart, Cheng (1999) проделали экспериментальную работу на выпускном клапане двигателя Ford 2L Zetec. В исследовании термодатчики были приварены у миниатюрного отверстия на внешней поверхности клапана методом ручной дуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа (TIG — Tungsten Inert Gas). Эксперимент проводился в двух режимах: стационарном и нестационарном. Стационарное состояние использовалось для калибровки системы, затем температура клапана измерялась как функция времени.

3.1. Оценка контактной теплопроводности между клапаном и гнездом

Для оценки и прогнозирования контактной теплопроводности (КТ) использовались различные методы. В настоящем разделе рассмотрим эти методики. В работе (Huang, Ju, 1993) для определения теплоемкости периодического теплового контакта между выпускным клапаном и гнездом в двигателе внутреннего сгорания использовалась обратная задача. Для ее решения применялся метод сопряженных градиентов. Paradis et al. (2002) исследовали теплообмен между выпускным клапаном и гнездом в охлаждаемом воздухом одноцилиндровом двигателе с алюминиевым блоком. Они ввели нелинейную динамическую тепловую модель для описания течения газа и теплообмена в нестационарном и стационарном режимах. Также здесь был использован метод сосредоточенных параметров для оценки контактного теплового сопротивления выпускного клапана и его гнезда.

В работе (Shojaefard, Ghaffarpour, Noorpoor, 2008) экспериментально исследовалась одномерная теплопередача на поверхности двух контактирующих стержней. Метод идентификации системы здесь использовался для контроля за температурой клапана. Данным методом с помощью температуры контактирующих поверхностей можно оценить функцию контактной теплопередачи.

Нелинейная динамическая тепловая модель с сосредоточенными параметрами для описания переходных процессов в цилиндре двигателя с использованием некоторых узлов была представлена в работе (Nichols et al., 2000) (рис. 3). Она разрабатывалась для облегчения изучения поверхностного зажигания, имеющего место вследствие перегрева выпускных клапанов. Данная модель тепловой системы используется для описания теплового режима клапанов двигателя для улучшения контроля за температурой.

В работе (Goudarzi et al., 2015) использовался алгоритм обратного распространения нейронной сети (BPN) для прогнозирования контактной теплопроводности между клапаном и его гнездом. Необходимая информация для проектирования нейронной сети была получена с помощью обратного метода. Результаты показали, что алгоритм Левенберга–Марквардта является лучшим для оценки КТ.

4. Влияние различных параметров на контактную теплопроводность

К факторам, которые влияют на контактную теплопередачу и теплопроводность относятся контактное давление, частота контакта, температура охлаждающей жидкости, тепловой поток, шероховатость поверхности, радиус кривизны контактирующих

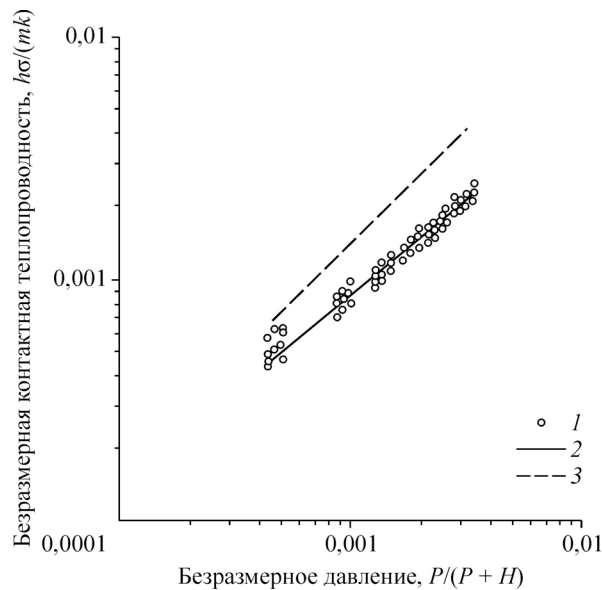


Рис. 4. Изменение безразмерной контактной теплопроводности в зависимости от безразмерного контактного давления (Ху, Ху, 2005).

1 — эксперимент, 2 — корреляция $h\sigma(mk) = 0,19[P/(P + H)]^{0,19}$, 3 — модельный расчет.

т.е. $m = (m_1^2 + m_2^2)^{0,5}$, σ — эффективная среднеквадратичная шероховатость поверхности,

т.е. $\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0,5}$, P — контактное давление, H — микротвердость более мягкого материала, E — нормированный модуль упругости контактирующих материалов. В соответствии с уравнениями (1) и (2) при пластической деформации контактное давление будет изменять реальную площадь контакта и таким образом повлияет на контактную теплопроводность. На рис. 4 показано изменение безразмерной контактной теплопроводности в зависимости от безразмерного контактного давления.

Существует также степенная зависимость между контактной теплопроводностью и контактным давлением. С помощью регрессионного анализа и представленных данных было выявлено, что связь между безразмерной КТ и безразмерным контактным давлением можно записать следующим образом: $h\sigma(mk) = 0,19[P/(P + H)]^{0,78}$ (Ху, Ху, 2005). В двигателях внутреннего сгорания при одной и той же частоте контакта и постоянном приложенном тепловом потоке с увеличением жесткости пружины значительно возрастает КТ. Следовательно, повышение жесткости пружины способствует увеличению контактного давления. Таким образом, число контактных пятен и реальная контактная поверхность увеличиваются.

Существует также степенная зависимость между контактной теплопроводностью и контактным давлением. С помощью регрессионного анализа и представленных данных было выявлено, что связь между безразмерной КТ и безразмерным контактным давлением можно записать следующим образом: $h\sigma(mk) = 0,19[P/(P + H)]^{0,78}$ (Ху, Ху, 2005). В двигателях внутреннего сгорания при одной и той же частоте контакта и постоянном приложенном тепловом потоке с увеличением жесткости пружины значительно возрастает КТ. Следовательно, повышение жесткости пружины способствует увеличению контактного давления. Таким образом, число контактных пятен и реальная контактная поверхность увеличиваются.

4.2. Влияние температуры поверхности на контактную теплопроводность

Установлено, что контактная теплопроводность возрастает вследствие увеличения температуры контактирующих поверхностей (Xiao et al., 2004; Wang, Degiovanni, 2002; Mukhaylyk et al., 2012). По сравнению с влиянием давления на поверхности раздела влияние температуры контактирующей поверхности на КТ более очевидно (Dongmei et al., 2012). На рис. 5 изображено изменение контактной теплопроводности в зависимости от средней температуры поверхности раздела. Видно, что КТ резко возрастает с увеличением температуры контактирующей поверхности раздела (Liu, Shang, 2013).

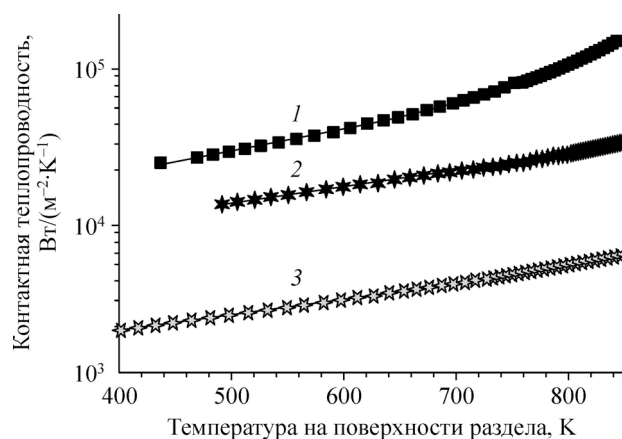


Рис. 5. Изменение контактной теплопроводности в зависимости от средней температуры поверхности раздела (Liu, Shang, 2013).

Символы — с излучением на поверхности раздела, линии — без излучения на поверхности раздела; поверхность с шероховатостью 0,532 (1), 36,2 (2), 49,7 (3) мкм.

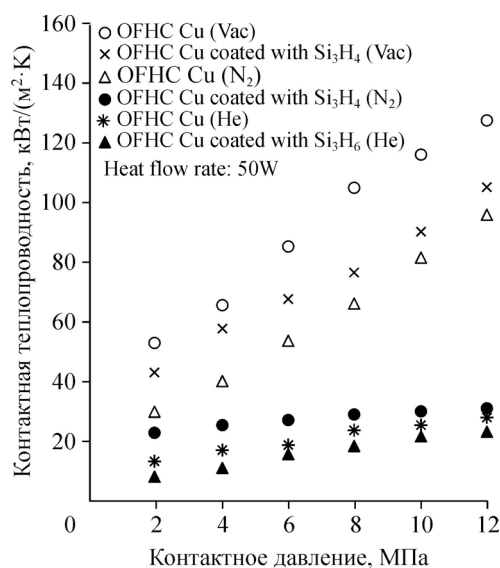
4.3. Влияние покрытия поверхности на контактную теплопроводность

Исследовано влияние некоторых покрытий материала на контактную теплопроводность. Установлено, что золотое покрытие уменьшало КТ (Misra, Nagaraju, 2010). Кроме того, выявлено, что контактная теплопроводность с теплопроводящим адгезивом на поверхности раздела выше, чем в его отсутствие (Liu et al., 2010). Исследование КТ на поверхности раздела образцов из бескислородной меди высокой проводимости с использованием распыленных пленок нитрида кремния показало, что покрытие из нитрида кремния уменьшает КТ почти в четыре раза (Keshirsagar et al., 2003) (рис. 6). Кроме того, за счет увеличения толщины покрытия контактирующие поверхности становятся более гладкими и плоскими, а тепловой контакт увеличивается.

4.4. Влияние частоты контакта на контактную теплопроводность

Увеличение частоты контакта уменьшает КТ: хотя частота контакта увеличивается, его период уменьшается, в результате контактная теплопроводность также уменьшается (Shojaeefard et al., 2015). Влияние частоты контакта на КТ показано на рис. 7 (Nezhad et al., 2016). В двигателях внутреннего сгорания за счет увеличения оборотов двигателя уменьшается КТ. С увеличением частоты тепловой поток, передаваемый от клапана гнезду, сокращается. Таким образом, температура клапана повышается, а температура гнезда уменьшается.

Рис. 6. Контактная теплопроводность бескислородной меди высокой проводимости с покрытием из Si₃N₄ и без покрытия (Keshirsagar et al., 2003). Обозначение см. в работе (Keshirsagar et al., 2003).



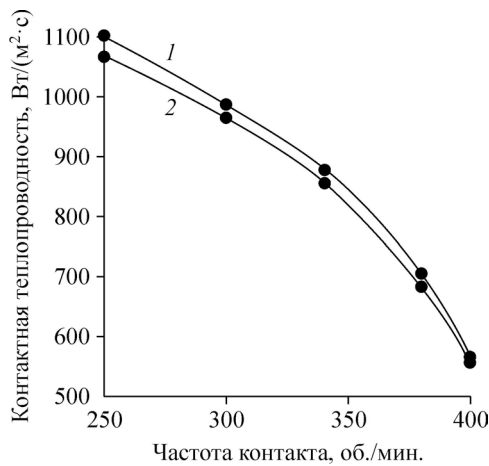


Рис. 7. Изменение контактной теплопроводности по сравнению с частотой контакта (Nezhad, Shojaeefard, Shahraki, 2016).

1 — метод линейной экстраполяции,
2 — CGH-метод с сопряженной задачей.

4.5. Влияние рельефа и шероховатости поверхности на контактную теплопроводность

Влияние рельефа поверхности на КТ при контакте поверхностей двух твердых тел исследовалось несколькими авторами (Xu, Xu, 2005; Yeh et al., 2001; Sadowski, Stupkiewicz, 2010). Было установлено, что шероховатость поверхности твердых тел находится в обратной зависимости от КТ. Влияние шероховатости поверхности на КТ для различных давлений поверхности раздела показано на рис. 8. Видно, что при увеличении шероховатости поверхности КТ снижается. Таким образом, при увеличении шероховатости поверхности реальная площадь контакта сокращается в результате уменьшения контактных пятен, т.е. число твердых точек для контактной проводимости убывает (Xu, Xu, 2005; Yeh et al., 2001).

Экспериментальная зависимость эффективной КТ при высокой доле реальной площади контакта была предложена в работе (Sadowski, Stupkiewicz, 2010):

$$h_{\text{eff}} = \frac{\alpha h_{\text{loc}}}{1 + (1 - \alpha)(0,146 h_{\text{loc}} S_m / k_{\text{eq}})^{0,92}}, \quad (3)$$

где α — доля площади реального контакта, h_{loc} — локальная контактная теплопроводность. Кроме того, существует линейная корреляция между l и S_m :

$$l = 0,146 S_m. \quad (4)$$

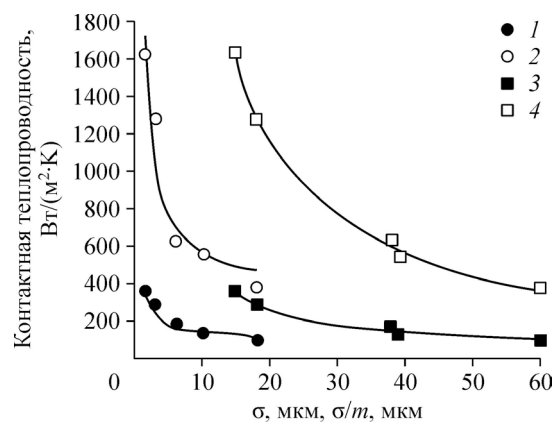


Рис. 8. Влияние шероховатости поверхности на КТ (Xu, Xu, 2005).

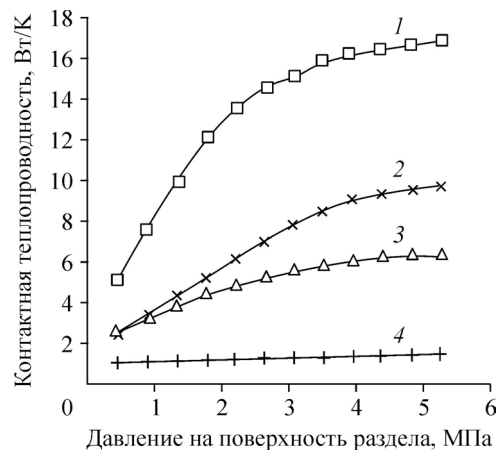
Влияние шероховатости поверхности σ при давлении $P = 1$ (1), 7 (2) МПа и удельной шероховатости поверхности σ/m при давлении $P = 1$ (3), 7 (4) МПа.

Рис. 9. Экспериментальные значения КТ для прямого контакта между поверхностями из одного и того же материала с шероховатостью 5 мкм (Singhal et al., 2005).

1 — медь, 2 — алюминий, 3 — латунь, 4 — нержавеющая сталь.

4.6. Влияние свойств материала, поглощенного поверхностью раздела, на контактную теплопроводность

Изменение КТ для различных контактирующих материалов показано на рис. 9. Видно, что теплопроводность, свойства материала и предел текучести материалов поверхности в значительной степени влияют на расчет КТ. Более высокий предел текучести и отношение модуля упругости Юнга к микротвердости приводят к уменьшению КТ при прочих равных условиях (Singhal et al., 2005; Chow et al., 2012; Cuicui et al., 2013).

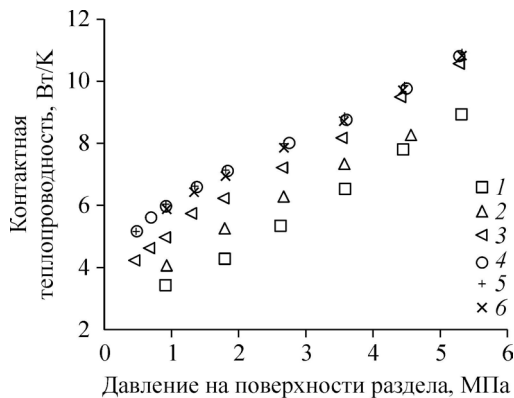


4.7. Влияние проводимости и свойств газового разрыва на контактную теплопроводность

Несколько моделей, в которых рассматривались теплопроводность зазора и корреляции, были представлены в работах (Song et al., 2009; Cetinkale, Fishenden, 1951; Rapi-er et al., 1963; Шлыков, 1965; Veziroglu, 1967; Lloyd et al., 1973; Garnier, Begej, 1979; Loyalka, 1982; Yovanovich et al., 1982; Wahid, Madhusudana, 2000). В случае использования газа на поверхности раздела двух контактирующих твердых тел проводимость разрыва зависит от давления, микротвердости и шероховатости поверхности, наклона средних выступов шероховатости, давления, температуры и других свойств газа, а также от теплопроводности газа и контактирующих материалов. Влияние теплопроводности разрыва на КТ играет более существенную роль при низких давлениях.

4.8. Влияние загрузочно-разгрузочных циклов на контактную теплопроводность

Когда две шероховатые поверхности проходят циклы загрузки-разгрузки, КТ между ними во время второй и последующих загрузок выше, чем при первой загрузке. Это



связано с процессом непрерывной деформации уступов на шероховатости контактирующих поверхностей. Как показано на рис. 10, для начального цикла

Рис. 10. Влияние циклов загрузки и разгрузки на КТ между двумя контактирующими поверхностями (Singhal et al., 2005).

Первая (1) и вторая (3) загрузки, первая (2) и вторая (4) разгрузки, устойчивое состояние при загрузке (5) и разгрузке (6).

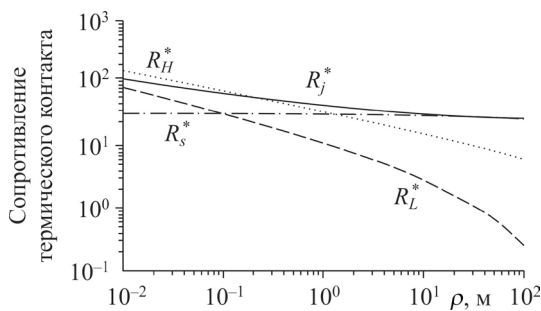


Рис. 11. Влияние радиуса кривизны на СТК (Bahrami et al., 2004) при $\sigma = 1,41$ мкм, $F = 50$ Н.

Обозначения см. в работе (Bahrami et al., 2004).

увеличение КТ имеет место при беспрерывных нагрузках. После двух циклов загрузки КТ достигает постоянного значения (Singhal et al., 2005).

4.9. Влияние радиуса кривизны поверхности на контактную теплопроводность

На рис. 11 показано влияние радиуса кривизны поверхности на сопротивление теплового контакта. При очень малом радиусе из-за небольшого размера макроконтактов доминирует макротепловое сопротивление. При увеличении радиуса кривизны и приближении к плоской поверхности доминирует микротепловое сопротивление (Bahrami et al., 2004).

Заключение

В статье представлен обзор исследований постоянной и периодической передачи тепла. Изучены контактный теплообмен между выпускным клапаном и гнездом в двигателе внутреннего сгорания, а также влияние некоторых параметров, таких как контактное давление, частота контактов, рельеф и шероховатость контактирующих поверхностей, радиус кривизны поверхностей, циклы загрузки–разгрузки, теплопроводность и свойства газового зазора, свойства материала, поглощенного поверхностью, покрытие поверхности и температура поверхности, на контактную теплопроводность.

Для оценки интенсивности контактной теплопередачи широко используются эксперименты и численные методы, такие как метод конечных разностей и метод конечных элементов, линейная экстраполяция и обратный метод. Для решения задач, требующих данных о температуре в точках контакта и в нескольких конкретных точках вблизи контактной области, оптимальный подход заключается в использовании аналитических решений. Нестационарная КТ не может быть рассчитана методом интерполяции. Чтобы экстраполированные значения точно оценивали температуру поверхностей и тепловой поток, место измерения температуры должно находиться очень близко к поверхности. В противном случае ошибка метода экстраполяции будет существенной. Однако в большинстве случаев минимальное расстояние для установки термодпары у поверхности ограничивается механически. Очевидно, что требуется совершенствование методов оценки КТ для измерения быстро меняющейся температуры в контактной поверхности. Точным методом, который может быть использован для этой цели, является обратный метод. В нем тепловой поток на всей контактной поверхности рассматривается как непрерывный. Полученная КТ является нелинейной и оценивается в результате каждой итерации. Для решения задачи этим методом непосредственно в каждом шаге итерации применяется эффективный (по времени) численный метод конечных разностей. В большинстве случаев обратный метод может быть использован, когда прямое решение задачи затруднительно. Например, в некоторых случаях возникает необходимость измерения теплового потока через коррозированные поверхности или поверхности в печах, либо через поверхности, сваренные друг с другом. Другой пример — это поток тепла между клапаном и гнездом в двигателе внутреннего сгорания, где шаг контакта по времени слишком мал. В этих случаях прямое измерение является очень трудным или даже невозможным, и лучшим методом решения задачи является обратный метод.

В результате изучения влияния различных параметров на КТ можно сделать следующие выводы. Контактная передача тепла нелинейно возрастает при увеличении контактного давления. КТ возрастает при увеличении температуры контактирующих поверхностей. По сравнению со случаем влияния давления на поверхности раздела влияние температуры контактирующих поверхностей на величину КТ более очевидна. Увеличение частоты контакта уменьшает КТ. Шероховатость поверхности двух контактирующих твердых тел обратно пропорциональна КТ. Более высокий предел текучести и отношение модуля упругости Юнга к микротвердости приводит к уменьшению КТ при прочих равных условиях. Влияние разрыва теплопроводности на КТ повышается при более низких давлениях. Когда две шероховатые поверхности проходят циклы загрузки-разгрузки, КТ между этими циклами для второй и последующих загрузок выше, чем при первой загрузке. В двигателях внутреннего сгорания с увеличением числа оборотов двигателя КТ уменьшается. С увеличением частоты тепловой поток от клапана к гнезду сокращается; таким образом, повышается температура клапана и снижается температура гнезда. Если в месте контакта поставить пружину, то с увеличением ее жесткости при такой частоте контакта и постоянном приложенном тепловом потоке КТ существенно возрастает. Следовательно, число контактных пятен и реальная контактная поверхность увеличиваются.

Список литературы

- Попов В.М., Чернышов А.Д., Карпов А.А.** 2008. Контактная теплопроводность через периодически соприкасающиеся стержни // Инж.-физ. журн. Т. 81, № 5. С. 977–988.
- Шлыков Ю.П.** 1965. Расчет термического сопротивления контакта обработанных металлических поверхностей // Теплоэнергетика. № 10. С. 79–82.
- Ayers G.H.** 2003. Cylindrical thermal contact conductance // M.S Dissertation. Texas: Texas A&M University, College Station. 186 p.
- Bahrami M., Culham J.R., Yovanovich M.M., Schneider G.E.** 2004. Thermal contact resistance of nonconforming rough surfaces. Part 2: Thermal model // J. Thermophysics and Heat Transfer. Vol. 18, No. 2. P. 218–227.
- Berman R.** 1956. Some experiments on thermal contact at low temperatures // J. App. Phys. Vol. 27, Iss. 4. P. 318–323.
- Berman R., Mate C.F.** 1958. Thermal contact at low temperatures // Nature. Vol. 182. P. 1661–1663.
- Cengel Y.A., Turner R.H.** 2001. Fundamentals of thermal-fluid sciences // Int. Edition. Singapore: McGraw-Hill.
- Cetinkale T.N., Fishenden M.** 1951. Thermal conductance of metal surfaces in Contact // Proc. General Discussion on Heat Transfer. Inst. Mechanical Engineers and ASME, London. P. 271–275.
- Chen T.C., Tuan P.C.** 2002. Inverse problem of estimating interface conductance between periodically contacting surfaces using the weighting input estimation method // Numerical Heat Transfer. Part B: Fundamentals. Vol. 41. P. 477–492.
- Chow J.H., Zhong Z.W., Lin W., Khoo L.P.** 2012. An investigation of thermal contact conductance using the lumped parameter method // Inter. J. Thermal Sci. Vol. 60. P. 114–121.
- Cooper M., Mikic B.B., Yovanovich M.M.** 1969. Thermal contact conductance // J. Heat and Mass Transfer. Vol. 12. P. 279–300.
- Corbett K.A., Sawada A., Smith E.N.** 1994. Thermal and electrical conductance across copper joints below 100 mK // Physica B. Vol. 194–196. P. 1211–1212.
- Cowart J., Cheng W.** 1999. Intake valve thermal behavior during steady-state and transient engine operation // SAE Technical Paper No. 1999-01-3643.
- Cuicui J., Hua Z, Wei J.** 2013. Fractal prediction model of thermal contact conductance of rough surfaces // Chinese J. Mech. Engrng. Vol. 26, Iss. 1. P. 128–136.
- Deutsch M.** 1979. Thermal conductance in screw-fastened joints at helium temperatures // Cryogenics. Vol. 19, No. 5. P. 273–274.
- Didschuns I., Woodcraft A.L., Bintley D., Hargrave P.C.** 2004. Thermal conductance measurements of bolted copper to copper joints at sub-Kelvin temperatures // Cryogenics. Vol. 44, No. 5. P. 293–299.
- Ding C., Wang R.** 2012. Thermal conductance of stainless steel-GFRP interface under vacuum environment // Experimental Thermal and Fluid Sci. Vol. 42. P. 1–5.
- Dongmei B., Huanxin C., Ye T.** 2012. Influences of temperature and contact pressure on thermal contact resistance at interfaces at cryogenic temperatures // Cryogenics. Vol. 52. P. 403–409.
- Fan S., Barber J.R.** 2002. Solution of periodic heating problems by the transfer matrix method // Elsevier Sci. P. 1155–1158.
- Fieberg C., Kneer R.** 2008. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements // Inter. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 51. P. 1017–1023.

- Flach G.P., Ozisik M.N.** 1988. Inverse heat conduction problem of periodically contacting surfaces // *J. Heat Transfer*. Vol. 110. P. 821–829.
- Fletcher L.S.** 1988. Recent developments in contact conductance heat transfer // *J. Heat Transfer*. Vol. 110, No. 4b. P. 1059–1070.
- Garnier J.E., Begej S.** 1979. Ex-reactor determination of thermal gap and contact conductance between uranium dioxide: zircaloy-4 interfaces. Stage I: Low gas pressure // Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC. Rept, April, 1979.
- Goudarzi K., Moosaei A., Gharaati M.** 2015. Applying artificial neural networks (ANN) to the estimation of thermal contact conductance in the exhaust valve of internal combustion engine // *Applied Thermal Engng.* Vol. 87. P. 688–697.
- Goudarzi K., Shojaeefard M.H., Fazelpour M.** 2008. Effect of contact pressure and frequency on contact heat transfer between exhaust valve and its seat // *Archive of SID*. Vol. 21, No. 4. P. 401–408.
- Howard J.R.** 1975. An experimental study of heat transfer through periodically contacting surfaces // *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 9. P. 367–372.
- Howard J.R., Sutton A.E.** 1970. An analogue study of heat transfer through periodically contacting surfaces // *Inter. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 13. P. 173–183.
- Howard J.R., Sutton A.E.** 1973. The effect of thermal contact resistance on heat transfer between periodically contacting surfaces // *J. Heat Transfer*. Vol. 95, Iss. 3. P. 411–412.
- Huang C.H., Ju T.M.** 1993. Inverse problem of determining the periodic thermal contact conductance between exhaust valve and seat in an internal combustion engine // *National Heat Transfer Conference*. 345 E. New York.
- Karimi G., Li X., Teerstra P.** 2010. Measurement of through-plane effective thermal conductivity and contact resistance in PEM fuel cell diffusion media // *Electrochimica Acta*. Vol. 55. P. 1619–1625.
- Keshirsagar B., Nagaraju J., Krishna Murthy M.V.** 2003. Thermal contact conductance of silicon nitride-coated OFHC copper contacts // *Experimental Heat Transfer*. Vol. 16. P. 273–279.
- Khandelwal M., Mench M.M.** 2006. Direct measurement of through-plane thermal conductivity and contact resistance in fuel cell materials // *J. Power Sources*. Vol. 161. P. 1106–1115.
- Khounsary A.M., Chojnowski D., Assoufid L.** 2008. Thermal contact resistance across a copper-silicon interface // *SPIE*. Vol. 3151. P. 45–51.
- Lambert M.A., Fletcher L.S.** 1993. Review of the thermal contact conductance of junctions with metallic coatings and films // *J. Thermophysics and Heat Transfer*. Vol. 7, No. 4. P. 6–9.
- Lau K.M., Zimmermann J.W.** 1979. Screw-fastened joints for thermal contact at low temperatures // *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 50. P. 254–258.
- Liu J., Feng H., Luo X., Hu R., Liu S.** 2010. A simple setup contact resistance between interfaces of two contacted solid materials // *11th Inter. Conf. Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*.
- Liu D.H., Shang X.C.** 2013. The physical-mechanism based high-temperature thermal contact conductance model with experimental verification // *Chin. Phys. Lett.* Vol. 30, No. 3. P. 036501.
- Lloyd W.R., Wilkins D.P., Hill P.R.** 1973. Heat transfer in multicomponent monoatomic gases in the low, intermediate and high pressure regime // *Proc. Nuclear Thermionics Conf.*
- Luo X., Feng H., Liu J., Liu M.L., Liu S.** 2011. An experimental investigation on thermal contact resistance across metal contact interfaces // *Int. Conf. on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*. P. 733–738.
- Loyalka S.K.** 1982. A model for gap conductance in nuclear fuel rods // *Nuclear Technology*. Vol. 57, No. 2. P. 220–227.
- Madhusudana C.V., Fletcher L.S.** 1985. Contact heat transfer — the last decade // *AIAA J.* Vol. 24, No. 3. P. 510–523.
- Manninen M., Zimmermann J.W.** 1977. On the use of screw-fastened joints for thermal contact at low temperatures // *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 48. P. 1710–1711.
- Mikic B.B.** 1971. Analytical studies of contact of nominally flat surfaces: effect of previous loading // *J. Lubrication Technology*. P. 451–456.
- Mikic B.** 1974. Thermal contact conductance; theoretical consideration // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. Vol. 17, No. 2. P. 205–214.
- Milanez F.H., Yovanovich M.M., Culham J.R.** 2003. Effect of surface asperity truncation on thermal contact conductance // *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. Vol. 26, No. 1. P. 48–54.
- Milanez F., Yovanovich M.M., Mantelli M.B.H.** 2003. Thermal contact conductance at low contact pressures // *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. P. 23–26.
- Misra P., Nagaraju J.** 2010. Thermal gap conductance at low contact pressures: effect of gold plating and plating thickness // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. Vol. 53. P. 5373–5379.
- Moses W.M., Dodd N.C.** 1990. Heat transfer across aluminum/steel surfaces in periodic contact // *J. Thermophysics*. Vol. 4, No. 3. P. 396–399.
- Moses W.M., Johnson R.R.** 1988. Experimental study of the transient heat transfer across periodically contacting surfaces // *J. Thermophysics*. Vol. 2, No. 1. P. 37–42.
- Moses W.M., Johnson R.R.** 1989. Experimental results for the quasi-steady heat transfer through periodically contacting surfaces // *J. Thermophysics and Heat Transfer*. Vol. 3, No. 4. P. 474–476.
- Mykhaylyk V.B., Burt M., Ursachi C., Wagner A.** 2012. Thermal contact conductance of demountable in vacuum copper-copper joint between 14 and 100 k // *American Institute of Physics*. P. 034902-1–034902-6.

- Nezhad M.M., Shojaeefard M.H., Shahraki S.** 2016. Studying the transient thermal contact conductance between the exhaust valve and its seat using the inverse method. Vol. 37, Iss. 2. P. 1–25.
- Nichols R.W., Ramsey B.W., Marotta E.E., Wagner J.R.** 2000. Thermal periodic contact of exhaust valves in spark ignition internal combustion engines for improved control performance // 38th Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.
- Nitta I., Himanen O., Mikkola M.** 2008. Thermal conductivity and contact resistance of compressed gas diffusion layer of PEM fuel cell. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. P. 111–119.
- Orlande H.R.B., Ozisik M.N.** 1993. Inverse problem of estimating interface conductance between periodically contacting surfaces // J. of Thermophysics and Heat Transfer. Vol. 7, No. 2. P. 319–325.
- Ozisik M.N., Orlande H.R.B.** 2000. Inverse heat transfer: fundamental and applications. N.Y.: Taylor & Francis. 314 p.
- Paggi M., Barber J.R.** 2011. Contact conductance of rough surfaces composed of modified RMD patches // Inter. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 54. P. 4664–4672.
- Paradis I., Marotta E.E., Wagner J.R.** 2002. Thermal periodic contact of exhaust valves in spark ignition air-cooled engines // J. Thermophysics and Heat Transfer. Vol. 16, No. 3. P. 356–365.
- Pobell F.** 1992. Matter and Methods at Low Temperatures. Springer. 319 p.
- Rao V.V., Krishna Murthy M.V., Nagaraju J.** 2004. Thermal conductivity and thermal contact conductance studies on Al₂O₃/Al–AlN metal matrix composite // Composites Sci. and Technology. Vol. 64, Iss. 16. P. 2459–2462.
- Rapier A.C., Jones T.M., McIntosh J.E.** 1963. The thermal conductance of uranium dioxide/stainless steel interfaces // Inter. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 6, No. 5. P. 397–416.
- Rosochowska M., Chodnikiewicz K., Balendra R.** 2004. A new method of measuring thermal contact conductance // J. Materials Processing Technology. Vol. 145. P. 207–214.
- Sadeghi E., Djilali N., Bahrami M.** 2001. Effective thermal conductivity and thermal contact resistance of gas diffusion layers in proton exchange membrane fuel cells // J. Power Sources. Vol. 196. P. 246–254.
- Sadowski P., Stupkiewicz S.** 2010. A model of thermal contact conductance at high real contact area fractions // Wear. Vol. 268. P. 77–85.
- Savija I., Culham J.R., Yovanovich M.M., Marotta E.E.** 2003. Review of thermal conductance models for joints incorporating enhancement materials // J. Thermophysics and Heat Transfer. Vol. 17, No. 1. P. 34–52.
- Savija I., Yovanovich M.M., Culham J.R., Marotta E. E.** 2003. Thermal joint resistance of conforming rough surfaces with grease-filled interstitial gaps // J. Thermophysics and Heat Transfer. Vol. 17, No. 2. P. 278–282.
- Shojaeefard M.H., Goudarzi K., Mazidi M.S.** 2009. Inverse heat transfer problem of thermal contact conductance estimation in periodically contacting surfaces // J. Thermal Sci. Vol. 18, No. 2. P. 150–159.
- Shojaeefard M.H., Mousapour V., Mazidi M.** 2015. The investigation of the valve spring stiffness influence on the thermal contact conductance between the exhaust valve and its seat // J. Heat Transfer Engng. Vol. 36, Iss. 1. P. 58–67.
- Shojaeefard M.H., Mazidi M.S., Mousapour V.K.** 2013. The estimation of time-varying thermal contact conductance between two fix contacting surfaces // Mechanica. Vol. 19, No. 2. P. 167–171.
- Shojaeefard M.H., Noorpoor A.R., Bozchaloe D.A., Ghaffarpour M.** 2005. Transient thermal analysis of engine exhaust valve // Inter. J. Numerical Heat Transfer. Vol. 48. P. 1–18.
- Shojaeefard M.H., Ghaffarpour M., Noorpoor A.R.** 2008. Thermal contact analysis using identification method // Heat Transfer Engng. Vol. 29. P. 85–96.
- Shojaeefard M.H., Noorpoor A.R., Ghaffarpour M., Mohammadi F.** 2008. Analysis heat flow between seat and valve of ICE // American J. Appl. Sci. Vol. 4, Iss. 9. P. 700–708.
- Singhal V., Litke P.J., Black A.F., Garimella S.V.** 2005. An experimentally validated thermo-mechanical model for the prediction of thermal contact conductance // Inter. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 48. P. 5446–5459.
- Song S., Yovanovich M., Nho K.** 1989. Thermal gap conductance-effect of gas pressure and mechanical load // 27th Aerospace Sci. Meeting. Aerospace Sci. Meetings.
- Sridhar M.R., Yovanovich M.M.** 1994. Review of elastic and plastic contact conductance models: comparison with experiment // J. Thermophysics and Heat Transfer. Vol. 8, No. 4. P. 633–640.
- St-Georges L., Kiss L.I., Rouleau M.** 2009. Evaluation of contact pressure in electrodes of hall-heroult process // Light Metals. P. 1103–1108.
- Takahashi I., Fujiwara S.** 2001. Transient characteristics of thermal contact conductance between isotropic rough surfaces of metals // Heat Transfer—Asian Research. Vol. 30, No. 4. P. 341–356.
- Veziroglu T.N.** 1967. Correlation of thermal contact conductance experimental results // AIAA Paper. P. 67–317.
- Wahid S.M.S., Madhusudana C.V.** 2000. Gap conductance in contact heat transfer // Inter. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 43, No. 24. P. 4483–4487.
- Wang H., Degiovanni A.** 2002. Heat transfer through periodic macro-contact with constriction // Inter. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 45. P. 2177–2190.
- Wang J., Wang H., Zhuang H.** 2006. Thermal contact conductance of ceramic AlN and oxygen-free high-conductivity copper interfaces under low temperature and vacuum for high-temperature superconducting cryocooler cooling // Rev. Sci. Instrum. Vol. 77. P. 024901.
- Woodcraft A.L.** 2001. Comment on thermal boundary resistance of mechanical contacts between solids at sub-ambient temperatures // J. Phys. D: App. Phys. Vol. 34, Iss. 18. P. 2932–2934.
- Xiao Y., Sun H., Xu L., Feng H., Zhu H.** 2004. Thermal contact conductance between solid interfaces under low temperature and vacuum // Review of Scientific Instruments. Vol. 75, No. 9. P. 3074–3076.

- Xu R., Feng H., Zhao L., Xu L.** 2006. Experimental investigation of thermal contact conductance at low temperature based on fractal description // *Inter. Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 33. P. 811–818.
- Xu R., Xu L.** 2005. An experimental investigation of thermal contact conductance of stainless steel at low temperatures // *Cryogenics*. Vol. 45. P. 694–704.
- Yeh C.L., Wen C.Y., Chen Y.F., Yeh S.H., Wu C.H.** 2001. An experimental investigation of thermal contact conductance across bolted joints // *Experimental Thermal and Fluid Sci.* Vol. 25. P. 349–357.
- Yovanovich M.M.** 2005. Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics // *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. Vol. 28, No. 2. P. 182–206.
- Yovanovich M.M., DeVaal J.W., Hegazy A.A.** 1982. A statistical model to predict thermal gap conductance between conforming rough surfaces // *AIAA Paper No. 82–0888*.
- Yuncu H.** 2006. Thermal contact conductance of nominally flat surfaces // *Heat Mass Transfer*. Vol. 43. P. 1–5.
- Zhao J.F., Wang A.L., Yang C.X.** 2005. Prediction of thermal contact conductance based on the statistics of the roughness profile characteristics // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. Vol. 48. P. 974–985.

Статья поступила в редакцию 16 мая 2016 г.