



УДК 536.241
ГРНТИ 55.47.07

ТЕПЛООБМЕН В СОСТАВНЫХ СИСТЕМАХ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*А.Н. ВНУКОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
В.М. ПОПОВ, доктор технических наук, профессор
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
О.Р. ДОРНЯК, доктор технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Н.В. МОЗГОВОЙ, доктор технических наук, профессор
Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж)*

Приводятся результаты исследований процессов контактного теплообмена в соединениях с металлическими волнистыми поверхностями, которые характерны для конструкций авиационных и космических летательных аппаратов. Предложена расчетная методика для определения контактных термосопротивлений в зависимости от механической нагрузки и геометрических параметров контактирующих поверхностей. Проведено сопоставление расчетных данных с экспериментом.

Ключевые слова: контактное термосопротивление, тепловой поток, волнистая поверхность.

HEAT EXCHANGE IN COMPOUND SYSTEMS OF MODERN AIRCRAFT

*A.N. VNUKOV, Candidate of Technical Sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
V.M. POPOV, Doctor of Technical Sciences, Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
O.R. DORNYAK, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
N.V. MOZGOVOY, Doctor of Technical Sciences, Professor
Voronezh State Technical University (Voronezh)*

The results of studies of contact heat transfer in compounds with metal wavy surfaces, which are typical for structures of aircraft and spacecraft, are presented. A computational method for determining the contact thermal resistances depending on the mechanical load and the geometric parameters of the contacting surfaces is proposed. A comparison of the calculated data with the experiment.

Keywords: contact thermal resistance, heat flow, wavy surface.

Введение. При проектировании современных авиационных (АЛА) и космических (КЛА) летательных аппаратов решаются задачи прогнозирования развития температурных полей в составных конструкциях [1]. Выбор оптимальных режимов эксплуатации отдельных узлов и систем в целом АЛА и КЛА требует учета реальных процессов в зоне контакта между соприкасающимися металлическими поверхностями, где, как известно, вследствие дискретности контакта формируется контактное термическое сопротивление (КТС). От величины КТС зависит градиент температуры в зоне контакта, который, в свою очередь определяет температурные деформации компонентов систем. Если эти деформации существенны, то это ведет к недопустимым эффектам коробления или разрушения данных систем.



Актуальность. Вопросам контактного теплообмена посвящено большое число отечественных и зарубежных исследований [2–5]. В тоже время рекомендации по определению КТС, используемые в настоящее время на практике, в основном, пригодны для контактных пар с плоскими шероховатыми поверхностями. В реальных же конструкциях летательных аппаратов металлические поверхности имеют макроотклонения в форме периодически чередующихся волн, что связано с погрешностями технологического процесса изготовления деталей [6]. В данной работе получены расчетные зависимости, позволяющие осуществлять прогноз КТС для пар с волнистыми металлическими поверхностями, что несомненно актуально при проектировании современных авиационных и космических летательных аппаратов при прогнозировании развития температурных полей в их составных конструкциях.

Расчет контактного термосопротивления соединения волнистых поверхностей. Рассмотрим процесс переноса тепла через контактный переход между двумя контактирующими волнистыми поверхностями. Предположим, что отдельный элемент соединения представляется в форме, показанной на рисунке 1. Отметим, что обычно шаг волн S_w изменяется в пределах от 0,8 до 10 мм, а высота выступов волн W – от 0,03 мкм до 300 мкм.

Авторами работы [7] предложена модель формирования термосопротивлений на пути тепловых потоков, транспортируемых через соединения с контактирующими шероховатыми поверхностями при наличии волнистости.

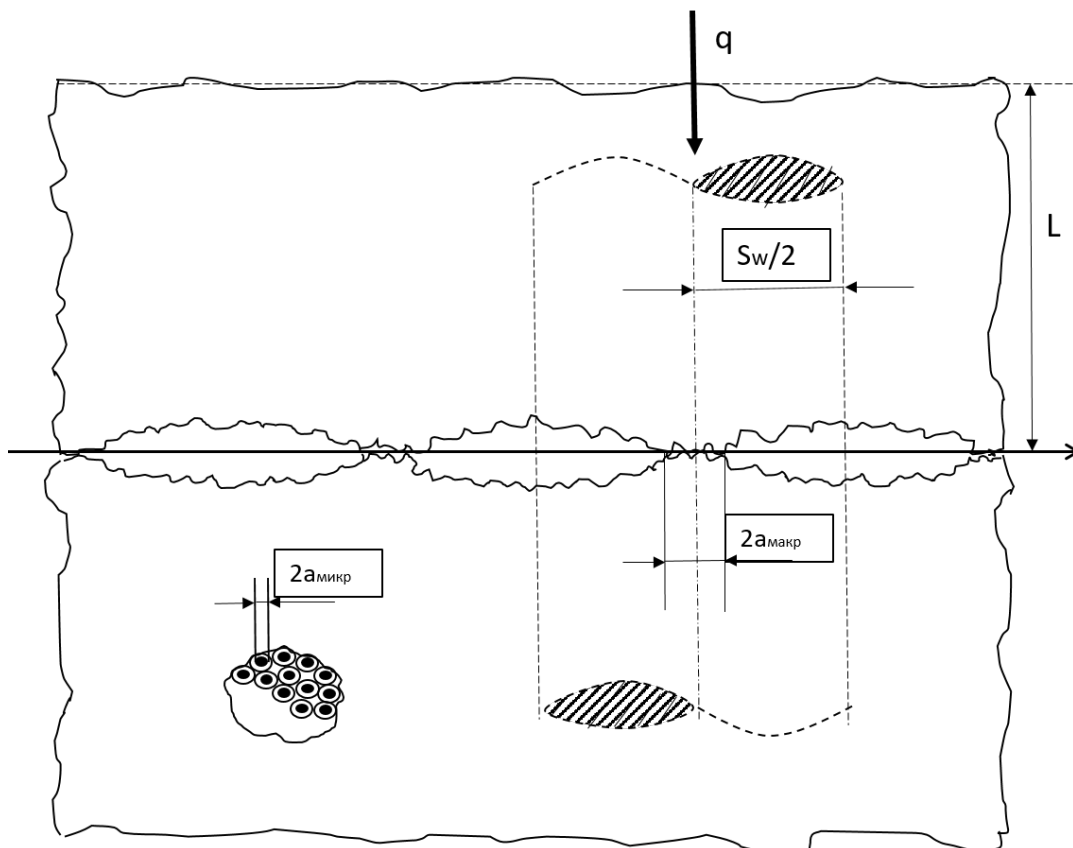


Рисунок 1 – Схема модельного элемента при контакте волнистых поверхностей

Принято считать, что тепловой поток при подходе к зоне контакта последовательно стягивается вначале к макроконтактным площадкам с радиусом $a_{макр}$, и затем к микроконтактным площадкам с радиусом $a_{микр}$. На пути теплового потока формируются последовательно соответствующие сопротивления $R_{ст.макр}$ и $R_{ст.микр}$, а общее термосопротивление фактического контакта выделенного макроэлемента можно записать в форме:



$$R'_B = R_{\text{ст.макр}} + R_{\text{ст.микр}} \quad (1)$$

С учетом результатов исследования [2] можно записать:

$$R'_B = \frac{\Phi_{\text{макр}}}{2\bar{\lambda}_M a_{\text{макр}}} + \frac{\Phi_{\text{микр}}}{2\bar{\lambda}_M \sum_i a_{\text{микр}i}} \quad (2)$$

Здесь $\bar{\lambda}_M = \frac{2\lambda_{M1}\lambda_{M2}}{\lambda_{M1} + \lambda_{M2}}$ – приведенный коэффициент теплопроводности материалов контактной пары; $a_{\text{микр}}$ – радиус микроконтактной площадки, который принято принимать равным 30 мкм [8]; $\Phi_{\text{макр}}$, $\Phi_{\text{микр}}$ – соответственно коэффициенты стягивания теплового потока к площадкам макро и микроконтактов, которые можно описать уравнениями через относительную площадь фактического η_3 и контурного η_2 контакта:

$$\Phi_{\text{микр}} = 1 - 1,58\eta_3^{1/2} + 0,58\eta_3^{3/2} \quad (3)$$

$$\Phi_{\text{макр}} = 1 - 1,58\eta_2^{1/2} + 0,58\eta_2^{3/2} \quad (4)$$

Если принять допущения, что микроконтакты равномерно располагаются в контурных площадках радиуса $S_w/2$; с каждым макроконтактом коаксиально связан круговой цилиндрический канал с радиусом, равным половине шага волны $S_w/2$; выдерживается условие $L \gg S_w/2$; а внешние поверхности цилиндра, за исключением поверхности непосредственного контакта и противоположных контакту торцов, адиабатны, тогда уравнение (2) для термосопротивления фактического контакта с волнистыми поверхностями в вакууме примет вид:

$$R_{\text{мв}} = \frac{\pi \Phi_{\text{макр}} S_w / 2}{2 \bar{\lambda}_M \eta_2^{1/2}} + \frac{\pi \Phi_{\text{микр}} a_{\text{микр}}}{2 \bar{\lambda}_M \eta_3} \quad (5)$$

Анализируя уравнение (5), можно видеть, что контактное сопротивление в наибольшей степени зависит от значений относительных площадей η_2 и η_3 . Принимая условие, что волны при нагружении деформируются в основном упруго и моделируя их набором сферических сегментов эквивалентного радиуса r_b с однородным распределением по высоте, можно применить теорию Герца с условием, что $1 - \mu^2 = 0.9$ (μ – коэффициент Пуассона).

Тогда с учетом выводов [9] получаем следующие выражения для контакта плоской и волнистой поверхностей:

$$\eta_{2 \text{ в-пл}} = \left[1,68p \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \left(\frac{r_b}{W} \right)^{1/2} \right]^{2/3} \quad (6)$$

и для контакта двух волнистых поверхностей:

$$\eta_{2 \text{ в-в}} = \left[\frac{2,94p}{(W_1 + W_2)^{1/2}} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \left(\frac{r_{b1} r_{b2}}{r_{b1} + r_{b2}} \right)^{1/2} \right]^{4/5} \quad (7)$$

Здесь E – модуль упругости материала контактной пары; P – удельное давление.



Для рассматриваемой тепловой модели практический интерес представляют соединения, для которых справедливо равенство:

$$\frac{W_i}{L/2} \approx \frac{L/2}{2r_{vi}} \quad (i=1,2). \quad (8)$$

Используя соотношения (8) и принимая для большинства металлов и сплавов условие, что $1-\mu^2 \approx 0.9$, преобразуем выражения (6) и (7) к более удобному для расчетов виду:

$$\eta_{2 \text{ в-пл}} = 1,65 \left[\left(\frac{p}{E} \right) \left(\frac{L/2}{W} \right) \right]^{2/3}; \quad (9)$$

$$\eta_{2 \text{ в-в}} = 2,8 \left[\left(\frac{p}{E} \right) \left(\frac{L/2}{W_1 + W_2} \right) \right]^{4/5}. \quad (10)$$

Предлагаемая для инженерных расчетов формула (5) может применяться при проектировании КЛА, функционирующих, как правило, в условиях вакуума. Для определения полного КТС в системах АЛА, работающих в основном в среде воздуха, следует учитывать также термосопротивление, создаваемое на пути тепловых потоков воздушной прослойкой в зоне контакта поверхностей. В этом случае для контактных пар с волнистыми поверхностями справедливо уравнение [2]:

$$R_{\text{кв}} = \frac{1}{R_{\text{мв}}} + \frac{1}{R_c}, \quad (11)$$

где R_c – термосопротивление, создаваемое воздушной прослойкой в зоне раздела.

Термосопротивление R_c обычно представляется суммой сопротивлений за счет объемной теплопроводности в виде:

$$R_c = \frac{\bar{\zeta}}{\lambda_c}, \quad (12)$$

где λ_c – коэффициент теплопроводности среды в межвыступном пространстве (воздуха);

$\bar{\zeta}$ – толщина прослойки, эквивалентная по объему межвыступному пространству.

Термосопротивление для контактов с волнистыми поверхностями находится согласно выражению:

$$R_c = \frac{(W_{\text{макс}_1} + W_{\text{макс}_2})(1 - \varepsilon_{\text{вв}}) + (R_{\text{макс}_1} + R_{\text{макс}_2})(1 - \varepsilon_{\text{в-пл}})}{\lambda_c}. \quad (13)$$

Здесь $R_{\text{макс}}$ – максимальная высота микронеровностей; $\varepsilon_{\text{вв}}$ и $\varepsilon_{\text{в-пл}}$ – относительное сближение волнистых поверхностей и волнистой и шероховатой поверхностей под нагрузкой.

Согласно данным работы [10] относительное сближение волнистых или плоской и волнистой поверхностей запишется следующим образом:



$$\varepsilon_{B-B} = 1,95 \frac{W_{\text{макс}}^{4/5}}{R_{\text{макс}}} \left(\frac{p}{E} \right)^{2/5} \left(\frac{r_{B1} r_{B2}}{r_{B1} + r_{B2}} \right)^{1/5}; \quad (14)$$

$$\varepsilon_{B-ПД} = 4,15 \frac{W_{\text{макс}}^{2/3}}{R_{\text{макс}}} \left(\frac{p}{E} \right)^{2/3} r_B^{1/3}. \quad (15)$$

Входящие в (11) термосопротивление R_{MB} рассчитывается по формуле (5), для использования которой необходимо рассчитать относительную площадь фактического контакта η_3 . Приняв за основу сферическую модель выступов микронеровностей, можно использовать известную зависимость из монографии автора [11]:

$$\eta_3 = \left(\frac{\alpha^{\omega/v} b^{\omega/v} r^{\omega} p}{R_{\text{макс}}^{\omega} KB} \right)^{v/(v+\omega)}, \quad (16)$$

где ω – коэффициент, зависящий от характера деформации; B – коэффициент, характеризующий свойства материала контактной пары $B=B(v,\omega)$; b и v – параметры опорной поверхности [6]; α – коэффициент отношения площадей при сближении. Значения коэффициентов и параметров, входящих в зависимость (16), приведены в монографии [4] (табл. (2-4) – (2-7)).

Эксперимент. В целях апробации корректности предложенных расчетных зависимостей проведены экспериментальные исследования контактных пар из стали марки 1X18H9T с плоскошероховатыми поверхностями и поверхностями, имеющими волнистость. Сравниваются контактные пары с поверхностями разной волнистости.

Исследования проводились по стандартной методике определения КТС в условиях стационарного теплового режима в среде воздуха на установке стержневого типа [4].

В процессе проведенных исследований по формированию КТС в зависимости от механической нагрузки в пределах от 1 до 30 МПа при температуре в зоне контакта в пределах 380 К получены результаты, приведенные в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что наличие волнистости на поверхностях контакта повышает КТС в сравнении с контактными парами, имеющими только плоскошероховатые поверхности. Помимо этого, установлено, что с увеличением высоты волн растет величина КТС. Предложенные расчетные зависимости дают удовлетворительную сходимость с результатами опытов, которые согласуются с выводами работы [12], сделанных на основе экспериментов, определивших КТС для контактных пар из материала Д16Т для малых значений усилий сжатия. Результаты, полученные в данной работе, подтверждают универсальность представленной расчетной методики в широком диапазоне давлений.

Таблица 1 - Зависимость контактного термосопротивления для контактных пар с волнистыми поверхностями от механической нагрузки

Материал контактной пары	Высота волны W , мкм	Средняя высота микронеровностей R_z , мкм	Контактное термосопротивление, $R_k \cdot 10^4$, $\text{m}^2\text{K}/\text{Вт}$ при давлении p , МПа (эксперимент/расчет)							
			1	3	5	10	15	20	25	30
Сталь марки 1X18H	12,6	1,8	$\frac{2,5}{2,26}$	$\frac{2,1}{2,0}$	$\frac{2,0}{1,8}$	$\frac{1,7}{1,5}$	$\frac{1,4}{1,3}$	$\frac{1,25}{1,2}$	$\frac{1,15}{1,1}$	$\frac{1,1}{1,06}$
– “ – (эксперимент)	0	1,8	1,85	1,8	1,56	1,4	1,2	1,16	1,0	0,96
– “ –	3,5	1,7	$\frac{0,95}{0,85}$	$\frac{0,86}{0,82}$	$\frac{0,8}{0,78}$	$\frac{0,76}{0,74}$	$\frac{0,7}{0,65}$	$\frac{0,65}{0,62}$	$\frac{0,6}{0,58}$	$\frac{0,6}{0,58}$



Выводы. На основании проведенного исследования термического сопротивления контактных пар, имитирующих составные конструкции в летательных аппаратах, предложены расчетные зависимости, которые дают возможность спрогнозировать величину КТС при конкретных условиях эксплуатации летательных аппаратов. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейших расчетах температурных полей длительно нагруженных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдудевский В.С. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1992. 327 с.
2. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1997. 328 с.
3. Мадхусудана К.В., Флетчер Л.С., Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия. // Аэрокосмическая техника. 1987. № 3. С. 103–120.
4. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 215 с.
5. Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел. // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 9. С. 945–970.
6. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.
7. Clausing A.M., Chao B.T. Thermal contact resistance in a vacuum environment. Univ. of Illinois Eng. Exp. Sta. Report METN. 241–1, august, 1963.
8. Boeschoten F., Von der Held E. The thermal conductance of contacts between aluminium and other metals. "Physica". 1957. Vol. 23. № 1. Pp. 37–44.
9. Timoshenko S., Coodier J. Theory of elasticity. Mc. Graw – Hill Boon Co. N.Y. 1951. 386 p.
10. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
11. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М.: изд-во АН СССР, 1962. 232 с.
12. Попов В.М., Ерин О.Л., Кондратенко И.Ю., Карпов А. А. Контактный теплообмен в соединениях с металлическими поверхностями, имеющими отклонения формы или волнистость // Лесотехнический журнал. 2015. № 4. С. 234–241.

REFERENCES

1. Avduevskij V.S. i dr. Osnovy teploperedachi v aviacionnoj i raketno-kosmicheskoy tehnikе. М.: Mashinostroenie, 1992. 327 p.
2. Shlykov YU.P., Ganin E.A., Carevskij S.N. Kontaktnoe termicheskoe soprotivlenie. М.: Energiya, 1997. 328 p.
3. Madhusudana K.V., Fletcher L.S., Kontaktnaya teploperedacha. Issledovaniya poslednego desyatiletija. // A`erokosmicheskaya tehnikа. 1987. № 3. pp. 103–120.
4. Popov V.M. Teploobmen v zone kontakta raz`emnyh i neraz`emnyh soedinenij. М.: Energiya, 1971. 215 p.
5. Mesnyankin S.YU., Vikulov A.G., Vikulov D.G. Sovremennyj vzglyad na problemy teplovogo kontaktirovaniya tverdyh tel. //Uspehi fizicheskikh nauk. 2009. Т. 179. № 9. pp. 945–970.
6. Izmajlov V.V., Novoselova M.V. Kontakt tverdyh tel i ego provodimost'. Tver': TGTU, 2010. 112 p.
7. Clausing A.M., Chao B.T. Thermal contact resistance in a vacuum environment. Univ. of Illinois Eng. Exp. Sta. Report METN. 241–1, august, 1963.



8. Boeschoten F., Von der Held E. The thermal conductance of contacts between aluminium and other metals. "Physica". 1957. Vol. 23. № 1. pp. 37–44.
9. Timoshenko S., Coodier J. Thcory of elasticity. Mc. Graw - Hill Boon Co. N.Y. 1951. 386 p.
10. Demkin N.B., Ryzhov `E.V. Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin. M.: Mashinostroenie, 1981. 244 p.
11. Demkin N.B. Fakticheskaya ploschad' kasaniya tverdyh poverhnostej. M.: izd-vo AN SSSR, 1962. 232 p.
12. Popov V.M., Erin O.L., Kondratenko I.Yu., Karpov A. A. Kontaktnyj teploobmen v soedineniyah s metallichesкими poverhnostyami, imeyuschimi otkloneniya formy ili volnistost' // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2015. №4. pp. 234–241.

© Внуков А.Н., Попов В.М., Дорняк О.Р., Мозговой Н.В., 2018

Внуков Алексей Николаевич, кандидат технических наук, начальник 24 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vnukovaleksei@mail.ru.

Попов Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник 24 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vmporov36@mail.ru.

Дорняк Ольга Роальдовна, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник 24 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ordornyak@mail.ru.

Мозговой Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Воронежский государственный технический университет, Россия, 394026, ЦФО, Воронежская область, г. Воронеж, Московский проспект, 14, nv_moz@mail.ru.