

УДК 621.891

DOI: 10.12737/article_59353e29a48eb2.21116479

В.П. Тихомиров, В.И. Воробьев, М.А. Измеров, Н.Н. Стрекалов, А.А. Пугачев

УМЕНЬШЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖДУ КОРПУСОМ СИЛОВОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА И ЕГО РАДИАТОРОМ

Показана связь состояния контакта между корпусом силового полупроводникового прибора и радиатором охлаждения с его нормальным тепловым режимом работы. Описаны процедуры моделирования контакта волнистых шероховатых поверхностей с определением основных геометрических и силовых параметров контактного взаимо-

действия, обеспечивающих необходимое термическое сопротивление для поддержания нормального теплового режима работы силового полупроводникового прибора.

Ключевые слова: тепловое сопротивление, контактная механика, волнистость, фрактальные поверхности, зазор.

V.P. Tikhomirov, V.I. Vorobiyov, M.A. Izmerov, N.N. Strekalov, A.A. Pugachyov

THERMAL RESISTANCE DECREASE BETWEEN CASE OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICE AND ITS RADIATOR

A connection of a contact state in the case of a power semiconductor device with the evaporator of a cooling radiator with its normal operation mode is shown. The procedures of modeling a corrugated rough surface contact with the definition of basic geometric and power parameters of the contact interaction ensur-

ing essential thermal resistance to support a normal thermal operation mode in a power semiconductor device are described.

Key words: thermal resistance, contact mechanics, rippling, fractal surfaces, gap.

Введение

В настоящее время электрические силовые установки повсеместно используются в локомотивостроении. Они дают множество преимуществ в сравнении с прямым механическим приводом посредством трансмиссии к ведущим колёсам локомотива, а самое важное – возможность точно и быстро управлять моментом на колесе и частотой вращения в зависимости от местных или других условий [1]. Но из-за высокой мощности силовых установок возрастают и требования к надёжности работы всех электрических схем и элементов. В основном их работоспособность определяется правильным температурным режимом, который, в свою очередь, обусловлен их конструкцией и материалами. Превышение допустимой температуры приведёт к выходу из строя электрических цепей питания или управления, что обездвижит локомотив. Поэтому при проектировании электрических схем локомотива уделяют большое внимание системам охлаждения.

В качестве элементов силовых элек-

трических схем и систем управления обычно применяют силовые полупроводниковые приборы промышленного производства, соответствующие заданной мощности. При их работе возникают электрические потери, которые трансформируются в тепловую энергию и приводят к их нагреву. Чтобы обеспечить нормальную работу силовых полупроводниковых приборов, необходимо контролировать их температуру, которая в отдельных случаях не должна превышать 125 ... 190 °С (в зависимости от их назначения) [2]. Ситуация усложняется тем, что из-за высокой мощности силового полупроводникового прибора происходит большое выделение теплоты со сравнительно небольшой поверхности кремниевого диска, что приводит к высокой плотности теплового потока, достигающей 120 В/см².

С рассеянием такого количества теплоты могут справиться довольно многие разные типы охладителей, например широко применяемые в локомотивостроении системы охлаждения с двухфазными гер-

метичными термосифонами и радиаторами с большой поверхностью теплообмена с воздухом и принудительной системой его циркуляции. Проблема заключается в том, чтобы обеспечить максимально малый перепад температур между кремниевым диском и радиатором испарителя, который находится в непосредственном контакте с силовым полупроводниковым прибором, т.е. обеспечить максимальную эффективность передачи тепла с полупроводникового прибора охладителю. Эффективному протеканию этого процесса мешает наличие зоны контакта, обусловленное волнистостью и шероховатостью поверхностей. Это приводит к значительному уменьше-

Постановка задачи исследования

В работе [3] был проведён анализ теплопередачи контактного взаимодействия двух поверхностей (рис. 1). На рис. 1 видно, что линии теплового потока наиболее интенсивны в областях фактического контакта (небольшие участки темного цвета, занимающие доли процента от номинальной площади).

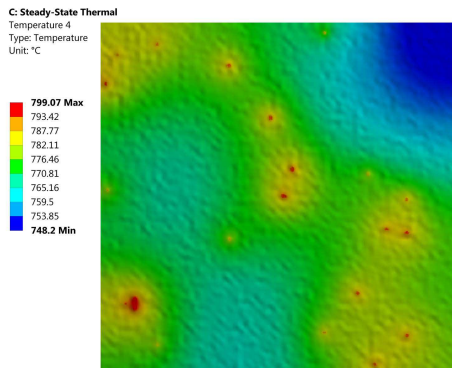


Рис. 1. Распределение температурного поля контакта поверхностей

Повысить эффективность теплопередачи контакта двух поверхностей можно несколькими способами:

- уменьшение шероховатости и волнистости поверхностей;
- увеличение фактической площади контакта за счёт сближения поверхностей;
- применение специальных теплопроводящих составов, мягких покрытий и т.д.

Анализ предложенных методов пока-

нию площади фактического контакта силового полупроводникового прибора с радиатором испарителя, а как известно, теплопроводность непосредственно контактирующих металлических тел на порядки превосходит теплопроводность среды в межконтактном зазоре, даже если он заполнен теплопроводящими составами. При этом чем меньше фактическая площадь металлического контакта, тем выше разница температур контактирующих поверхностей и тем меньше эффективность системы охлаждения, несмотря на её высокую способность к теплообмену с окружающей средой за счёт развитой системы ребрения, обдува и т.д.

зывает: эффективность первых двух методов довольно высока, а третий метод несколько им уступает за счёт того, что мягкие покрытия, которые увеличивают площадь контакта, как правило, имеют невысокую рабочую температуру, их коэффициент линейного расширения отличается от коэффициента линейного расширения основного материала, приводя к нарушению контакта и обратному эффекту, а также теплопроводящие составы имеют как минимум две границы перехода (поверхность полупроводника – теплопроводный состав и теплопроводный состав – поверхность радиатора испарителя), что существенно снижает эффективность теплопередачи.

В современной литературе встречаются попытки учесть влияние контактного взаимодействия поверхностей силового полупроводникового прибора и радиатора испарителя на процессы теплообмена с целью повышения эффективности передачи тепла испарителю и улучшения процесса охлаждения. Так, в работе [4] приводится следующее выражение для определения теплового сопротивления контактного зазора между кремниевым диском и испарителем:

$$\frac{1}{R_K} = \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_C}$$

Здесь R_K - тепловое сопротивление контакта; R_M - термическое сопротивление металла; R_C - термическое сопротивление

межконтактной среды.

Выражения для определения двух составляющих уравнения имеют вид

$$R_M = \sqrt{\pi h} 2\mu_M (\sqrt{2r - h} - \sqrt{h}) \sqrt{A_\phi N},$$

$$R_C = R_\Sigma (2\gamma + 1) \frac{1}{\mu_C (1 - A_\phi)},$$

Здесь h – высота зазора между поверхностями; r – радиус закругления вершин микронеровностей; μ_M и μ_C – соответственно теплопроводность металла и межконтактной среды; A_ϕ – фактическая площадь контакта; N – число пятен контакта; R_Σ – шероховатость эквивалентной поверхности; γ – относительный уровень деформации.

Данные формулы показывают удовлетворительную сходимость результатов расчёта и эксперимента на поверхностях с определёнными параметрами качества. Проблему представляет определение основных параметров исходного выражения (h , r , N , R_Σ и A_ϕ) для каждого конкретного случая и для заданной величины прижатия корпуса полупроводникового прибора к радиатору испарителя.

Для решения обозначенной пробле-

Контакт волнистых поверхностей

Рассмотрим контактное взаимодействие волнистых поверхностей. Пример

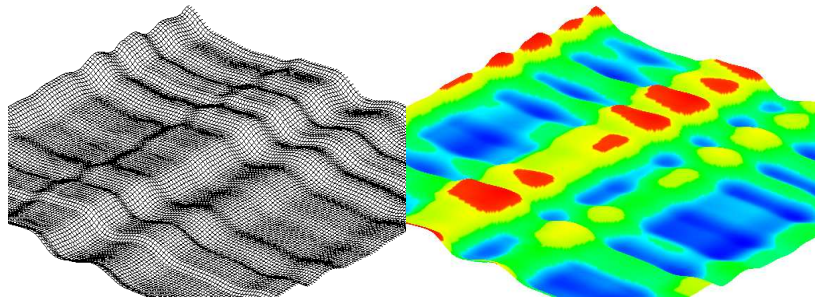


Рис. 2. Модели волнистых поверхностей: сеточная и твердотельная

Число волн можно определить выражением

$$n_w = A/W_{Sm},$$

где A – номинальный размер участка, т.е. длина стороны квадрата; W_{Sm} – средняя длина волны, определённая как среднее значение волнистости во взаимно перпендикулярных направлениях: $W_{Sm} = (W_{Sm1} + W_{Sm2})/2$.

В качестве модели волнистой по-

верхности рассмотрим контактное взаимодействие как двухуровневую модель контакта волнистых поверхностей с заданными параметрами и фрактальную модель контактного взаимодействия шероховатых поверхностей на контурных участках контактирующих волн [5]. Определить при этом усилие прижатия поверхностей очень важно, так как это позволит увеличить теплопроводность через межконтактный зазор без излишнего деформирования и повреждения элементов. Особенности же фрактального подхода [6] позволят исключить некоторые недостаточно обоснованные допущения, в частности: постоянство радиуса закругления верхней части неровностей и его независимость от величины сближения; введение в модель контактного взаимодействия таких факторов, не зависящих от масштаба (скейлинга), как фрактальная размерность и фрактальный параметр поверхности. При этом возможно использовать ЭВМ для автоматизации и ускорения расчётов, что немаловажно при решении контактных задач в 3D на больших участках поверхности с высокой детализацией.

поверхности, построенной методом сплайнов [5], представлен на рис. 2.

верхности примем набор радиально расположенных волн, имеющих в верхней части цилиндрическую форму. При этом учитывается случайный разброс амплитуд волн, подчиняющийся логарифмически нормальному закону распределения со среднеквадратической высотой волн W_q . Длина волны W_{Sm} и ее радиус r_w приняты постоянными. Пренебрегая шероховатостью, рассмотрим модель контактного взаимо-

действия гладкой поверхности с волнистой | (рис. 3 а).

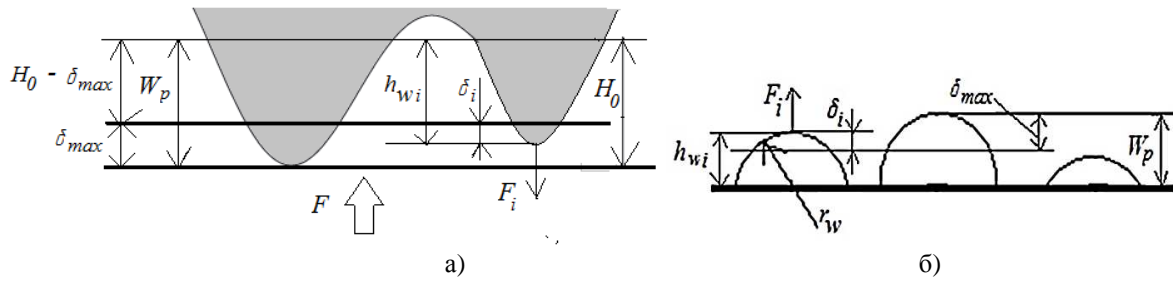


Рис. 3. Контакт гладкой поверхности с волнистой:
а - общий случай; б - имитационная модель контактного взаимодействия

Полагаем, что все вершины волн находятся в упругом контакте с сопряженной поверхностью. После приложения сжимающей силы зазор в контакте уменьшится на величину сближения поверхностей δ_{max} . Сила прижима F определяется исходя из принятой модели контактного взаимодействия волнистых поверхностей. Тогда погонная нагрузка на одну волну будет равна

$$p_i = \frac{F}{An_w}$$

Используя решение Герца, можно определить максимальное напряжение (случай параллельно расположенных цилиндров):

$$p_0 = 0,798 \sqrt{\frac{p_i [(R_1 + R_2) / (2R_1 R_2)]}{2(1 - \mu_1^2) / E_1 + 2(1 - \mu_2^2) / E_2}}$$

При этом полуширина площадки контакта будет равна

$$a = 0,798 \sqrt{2p_i \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_1} [2(1 - \mu_1^2) / E_1 + 2(1 - \mu_2^2) / E_2]}$$

где $R_{1,2}$ – радиусы цилиндров; $\mu_{1,2}$ – коэффициенты Пуассона; $E_{1,2}$ – модули упругости материалов сопряжения.

Так как волнистая поверхность представляется в виде набора цилиндров одинакового радиуса r_w , расположенных на разных уровнях по высоте, то необходимо для заданного сближения определить величину нагрузки, приходящейся на те выступы, что вступили в контакт с плоскостью, или решить обратную задачу по определению величины сближения при за-

данной нагрузке на волну. Для решения такой задачи воспользуемся имитационным моделированием.

1. Зададим нагрузку F , приходящуюся на n_w волн, и радиус закругления верхней части r_w . Приняв логарифмически нормальный закон распределения вершин волн, смоделируем волну, состоящую из n_w случайных величин (СВ). Определим начальное сближение δ_{max} волн [7], считая, что имеем только одну волну, по формуле

$$\delta = \frac{F}{A} (\lambda_1 + \lambda_2) \left\{ \ln \left[\frac{L^3}{4(\lambda_1 + \lambda_2) F \cdot r_w} \right] + 2,38629 \right\}.$$

Здесь $\lambda_i = (1 - \mu_i^2) / (\pi E_i)$, где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; r_w – радиус волны; F – нагрузка, приходящаяся на волну, которая подвергнута деформации до сближения δ . При предварительно рассчитанной величине сближения δ_{max} деформация i -й волны, согласно рис. 3 б, оказывается равной

$$\delta_i = h_{wi} - (W_p - \delta_{max}).$$

2. Найдем реакцию i -й волны F_i , соответствующую деформации δ_i . Сравним сумму ΣF_i реакций, приходящихся на n_w волн, с внешней нагрузкой F . Если $\Sigma F_i > F$, то следует уменьшить сближение: $\delta_{max} = \delta_{max} - \Delta$, где $\Delta = \delta_{max} / 2$. Если $\Sigma F_i < F$, то следует соответственно увеличить сближение:

$\delta_{max} = \delta_{max} + \Delta$. Если происходит смена неравенства с большего на меньшее или наоборот, то методом половинного деления уменьшаем Δ до $\Delta/2$. Расчет следует закончить, если выполняется условие

$$\frac{F - \sum_{i=1}^{S_{max}} F_i}{F} \leq [\varepsilon].$$

Здесь $[\varepsilon]$ – заданная точность (мы использовали $\varepsilon = 0,01$).

Можно для повышения точности расчётов провести несколько прогонов моделирования волн и по критерию Стюдента определить, достаточно ли со стати-

стической точки зрения выбранного нами числа экспериментов или нет.

По предложенной методике в среде C++ Builder была разработана программа, позволяющая смоделировать контакт волнистых поверхностей и рассчитать величину сближения и контурную площадь контакта волны с гладкой поверхностью при заданной нагрузке или определить величину нагрузки при заданном сближении (рис. 4).

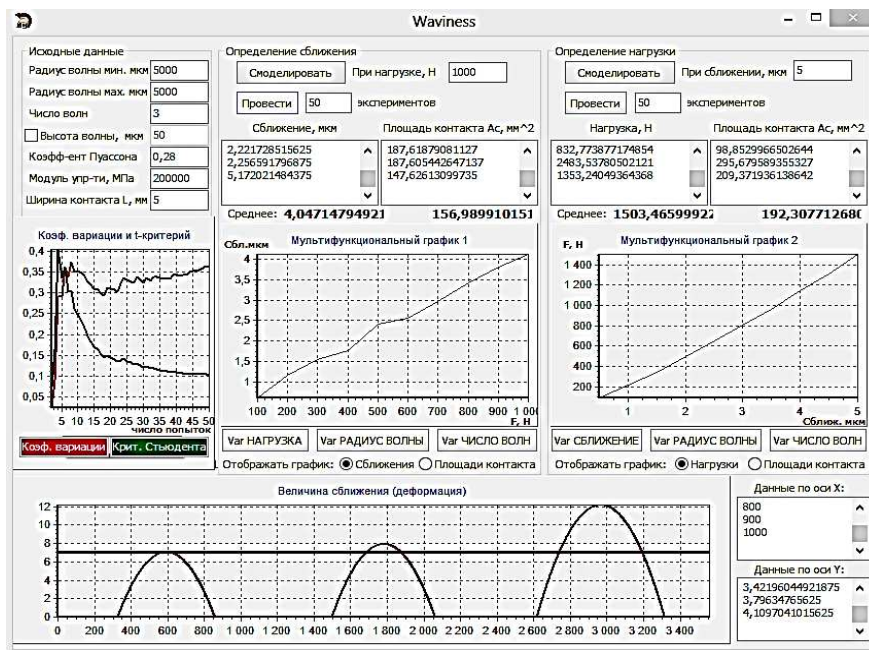


Рис. 4. Пример работы программы моделирования волны

Таким образом, представляется возможность определить число и величину контурных площадок контакта, на которых будут расположены фактические пятна

контакта, играющие главную роль при передаче тепла через стык поверхностей. Нагрузка и величина деформации волн при этом тоже становятся известными.

Моделирование контакта фрактальных шероховатых поверхностей

Этот контакт возникает на контурных площадках контакта волнистых поверхностей как фактическое взаимодействие сопряжённых поверхностей. Модель

$$Z(x,y) = c_z \sum_{n=0}^{N-1} q^{(D_s-3)n} \sum_{m=1}^M \sin \left\{ K q^n \left[x \cos \left(\frac{2\pi m}{M} \right) + y \sin \left(\frac{2\pi m}{M} \right) \right] + \theta_{nm} \right\}.$$

Здесь $Z(x,y)$ – высота поверхности с координатами x,y ; c_z – множитель; $q > 1$ – параметр пространственно-частотного

фрактальной шероховатой поверхности может быть представлена следующим выражением [8]:

масштабирования; D_s – фрактальная размерность моделируемой поверхности ($2 < D_s < 3$); N, M – число гармоник, или так

называемых микроволн; K – основное пространственное волновое число; θ_{nm} – случайная фаза, распределенная равномерно в интервале $[-\pi, +\pi]$.

Сомножитель c_z можно определить из соотношения

$$c_z = \left[\frac{2(1 - q^{2(D_S - 3)})}{M(1 - q^{2(D_S - 3)N})} \right]^{1/2}.$$

К алгоритмам моделирования фрактальных поверхностей можно отнести метод последовательного случайного сложения, предложенный Р.Ф. Фоссом, а также метод серединного смещения, применяя которые можно получить достаточно детализированную картину поверхности в объ-

ёме (3D). Эти алгоритмы были нами опробованы и протестированы. Составленная на языке программирования C++ программа даёт возможность не только увидеть в 3D смоделированную поверхность с её параметрами шероховатости, но и провести компьютерный эксперимент по контактированию двух шероховатых поверхностей (рис. 5) с определением всех необходимых фактических параметров контактирования для каждого конкретного случая в зависимости от исходных данных. Адекватность моделируемой поверхности также была нами подтверждена [9].

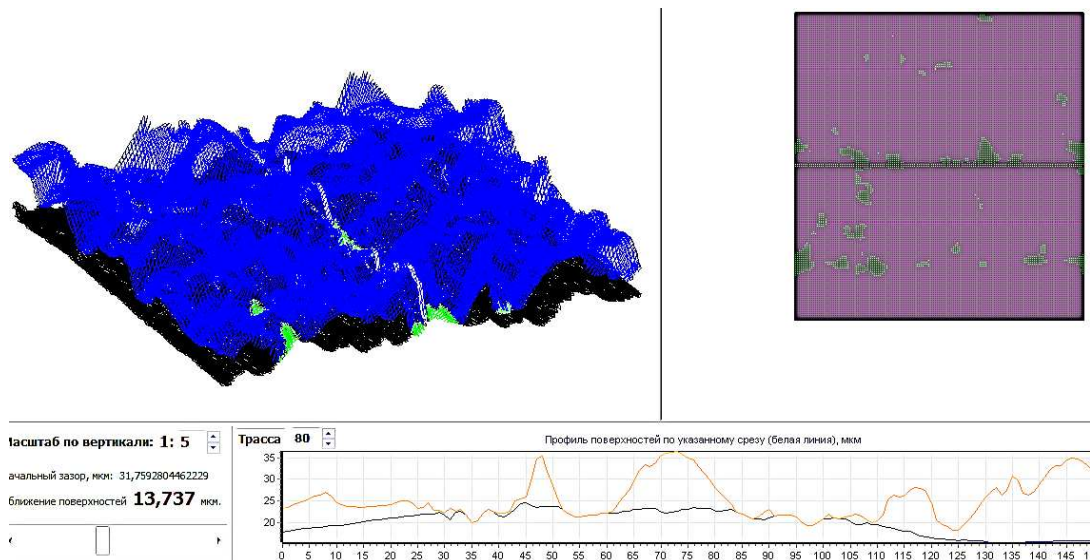


Рис. 5. Контактрование двух моделей поверхностей

Контактная механика фрактальных поверхностей. Для единичного пятна связь между нагрузкой и площадью соответственно при упругом и пластическом состояниях имеет вид

$$F_{\text{э0}}(a) = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} E G^{D-1} a_{\text{э}}^{(3-D)/2},$$

$$F_{\text{п0}}(a) = H_m a_{\text{п}},$$

где a – площадь пятна контакта, $a_{\text{э}} \in [a_{\text{min}}, a_{\text{с}}]$; $a_{\text{п}} \in [a_{\text{э-п2}}, a_{\text{max}}]$, a_{min} и a_{max} – максимальная и минимальная пло-

щади пятен контакта, $a_{\text{с}}$ – площадь пятна контакта, соответствующая переходу от упругого состояния к упругопластическому; E – модуль упругости; H_m – твердость поверхности; G – фрактальный параметр (по данным Д. Павелеску и А. Тудора [10], изменяется в пределах от $9,9 \cdot 10^{-16}$ до $1,2 \cdot 10^{-2}$ мкм).

Для множественного контакта найдем нагрузку, воспринимаемую упруго деформированными пятнами:

$$F_{\text{э}}(a) = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} E G^{D-1} (a_{\text{э}}^*)^{(3-D)/2} a_{\text{max}}^{(3-D)/2} N(A > a_{\text{min}}) \int_{a_{\text{min}}}^{a_{\text{с}}^*} C(a^{**})^{-\tilde{\alpha}} da^{**}.$$

Проведя математические преобразования с учётом числа пятен контакта

$$N(A > a_{min}) = \left(\frac{a_{max}}{a_{min}}\right)^{D/2} = (a_{min}^*)^{-D/2},$$

окончательно запишем:

$$F_s(a) = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} E G^{D-1} \frac{a_{max}^{(3-D)/2}}{(a_{min}^*)^{D/2}} \frac{1 - \hat{\alpha}}{2,5 - D - \hat{\alpha}} \frac{(a_c^*)^{2,5-D-\hat{\alpha}} - (a_{min}^*)^{2,5-D-\hat{\alpha}}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\hat{\alpha}}}.$$

Здесь a^* - относительная площадь, равная отношению площади пятна к максимальной площади касания, $a^* = a/a_{max}$; $a^{*'} -$ переменная интегрирования; $C -$ постоянная интегрирования; $\hat{\alpha} -$ показатель степени, соответствующий степенному закону распределения фактиче-

ских пятен контакта: $f(a^*) = C(a^*)^{-\hat{\alpha}}$.

Аналогично нагрузка, приходящаяся на пятна, находящиеся в пластическом состоянии при $1/a_c^* > 110a_c^*$, оценивается соотношением

$$F_p(a) = H_m a_{max} (a_{min}^*)^{-\frac{D}{2}} \int_{110a_c^*}^{1/a_c^*} C(a^{*'})^{1-\hat{\alpha}} da^{*'} = H_m a_{max} (a_{min}^*)^{-D/2} \frac{1 - \hat{\alpha}}{2 - \hat{\alpha}} \cdot \frac{1 - (a_{s-p2}^*)^{2-\hat{\alpha}}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\hat{\alpha}}}.$$

Кроме пятен, находящихся в упругом и пластическом состояниях, имеются пятна в упругопластическом состоянии (е-р - контакт). Изучение упругопластической деформации при контакте полусферы с

жесткой плоскостью с помощью метода конечных элементов [11] позволило записать соотношения между нагрузкой и относительной деформацией в следующем виде:

- для случая $a_c^* \leq a_{s-p1}^* < 6a_c^*$

$$F_{s-p1} = \frac{4,12}{3} \frac{a_c^D}{\pi G^{2(D-1)} (E')^2} \left(\frac{C\sigma_T}{2}\right)^2 (a_{min}^*)^{-\frac{D}{2}} \frac{1 - \hat{\alpha}}{2,425 - \hat{\alpha}} \frac{(6a_c^*)^{2,425-\hat{\alpha}} - (a_c^*)^{2,425-\hat{\alpha}}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\hat{\alpha}}};$$

- для случая $6a_c^* \leq a_{s-p1}^* < 110a_c^*$

$$F_{s-p2} = \frac{5,60}{3} \frac{a_c^D}{\pi G^{2(D-1)} (E')^2} \left(\frac{C\sigma_T}{2}\right)^2 (a_{min}^*)^{-\frac{D}{2}} \frac{1 - \hat{\alpha}}{2,263 - \hat{\alpha}} \frac{(110a_c^*)^{2,263-\hat{\alpha}} - (6a_c^*)^{2,263-\hat{\alpha}}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\hat{\alpha}}}.$$

Из условия равновесия найдем воспринимаемую нагрузку как

$$F = F_s(a) + F_{s-p1} + F_{s-p2} + F_p(a).$$

Площади упруго, упругопластически и пластически деформируемых пятен в конечном варианте соответственно равны

$$A_{rs} = \frac{(a_{min}^*)^{-D/2}}{2 - \hat{\alpha}} (a_{max}^{2-\hat{\alpha}} - a_{min}^{2-\hat{\alpha}});$$

$$A_{r(s-p1)} = \frac{0,94a_c}{(a_c^*)^{1,146}} (a_{min}^*)^{-\frac{D}{2}} \frac{1 - \hat{\alpha}}{2,146 - \hat{\alpha}} \frac{(6a_c^*)^{2,146-\hat{\alpha}} - (a_c^*)^{2,146-\hat{\alpha}}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\hat{\alpha}}};$$

$$A_{r(s-p2)} = \frac{0,94a_c}{(a_c^*)^{1,146}} (a_{min}^*)^{-\frac{D}{2}} \frac{1 - \hat{\alpha}}{2,146 - \hat{\alpha}} \frac{(110a_c^*)^{2,146-\hat{\alpha}} - (6a_c^*)^{2,146-\hat{\alpha}}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\hat{\alpha}}};$$

$$A_{rp} = a_{max} (a_{min}^*)^{-\frac{D}{2}} \frac{1 - \hat{\alpha}}{2 - \hat{\alpha}} \frac{(a_c^*)^{-(2-\hat{\alpha})} - (110a_c^*)^{2-\hat{\alpha}}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\hat{\alpha}}}.$$

Сближение можно найти из соотношения

$$\omega_{max} = \frac{\pi G^{D-1} a_{max}^{1-D/2}}{\varphi},$$

где

$$\varphi = \begin{cases} 2, & \text{если } \alpha^* > 110\alpha_c^*; \\ 2 - \alpha_c^*/\alpha^*, & \text{если } 1 \leq \alpha^* \leq 110\alpha_c^*; \\ 1, & \text{если } \alpha^* < 1. \end{cases}$$

Также представляется возможным определить параметр шероховатости [10]:

$$r = \frac{2^D \alpha^{D/2}}{\pi^{(4+D)/2} G^{D-1}}$$

При моделировании контакта шероховатых поверхностей практически все геометрические параметры известны, остаётся только определить величину нагрузки, воспринимаемую каждым фактическим пятном контакта при заданном сближении, и соотнести эту суммарную нагрузку с нагрузкой на отдельную волну, найденной

Вывод

Представленные выше методы дают возможность смоделировать 3D-контакт двух волнистых шероховатых поверхностей и достаточно точно определить необходимые параметры контактирования, не прибегая к необоснованному выбору искомым параметров по различным зависи-

при моделировании волнистости. Можно также решить и обратную задачу, когда задана нагрузка на контакт сопряжённых поверхностей и необходимо вначале определить число контурных пятен контакта с геометрическими и силовыми параметрами, а потом для каждой контурной площади смоделировать контакт фрактальных поверхностей с заданной нагрузкой, чтобы получить фактические пятна контакта с их размерами, числом и т.д.

ностям и рекомендациям, что существенно повысит точность расчёта теплопроводности сопряжённых поверхностей силового полупроводникового прибора и радиатора испарителя и позволит спроектировать эффективную систему охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугачев, А.А. Система управления тяговым асинхронным двигателем с минимизацией мощности потерь / А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, А.С. Космодамианский // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 2 (46). - С. 55-61.
2. Система управления тягового электропривода с контролем температуры теплонагруженных элементов / А.С. Космодамианский [и др.] // Электротехника. - 2014. - № 8. - С. 38-43.
3. Ежов, А.Д. Определение контактного термического сопротивления пары: композиционный материал С-Si-C и титановый сплав / А.Д. Ежов // Труды МАИ. - 2015. - № 82. - С. 1-15.
4. Грищенко, А.В. Повышение эффективности охлаждения силовых полупроводниковых приборов / А.В. Грищенко, И.Г. Киселёв, А.С. Корнев, Д.В. Крылов // Электротехника. - 2016. - № 5. - С. 32-36.
5. Измеров, М.А. Двухуровневая модель инженерной поверхности / М.А. Измеров // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы V междунар. науч.-практ. конф. / под ред. О.М. Голембиовской. - Брянск: БГТУ, 2013. - С. 121-123.
6. Тихомиров, В.П. Контактное взаимодействие фрактальных поверхностей / В.П. Тихомиров // Трение и износ. - 1997. - Т. 18. - № 3. - С. 369-374.
7. Chang, W. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces/ W. Chang, I. Etsion, D. Bogy // Journal of Tribology. - 1987. - V. 109. - P. 257-263.
8. Потапов, А.А. Теория рассеяния волн фрактальной анизотропной поверхностью / А.А. Потапов, А.В. Лактюнькин // Нелинейный мир. - 2001. - Т. 6. - № 6. - С. 3-36.
9. Тихомиров, В.П. Адекватность модели и реальной поверхности / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2012. - № 3. - С. 64-71.
10. Pavelescu, D. On the roughness fractal character, the tribological parameters and the error factors / D. Pavelescu, A. Tudor // Proceedings of the Romanian Academy. Ser. A. - 2004. - Vol. 5. - № 2.
11. Jackson, R.L. A Finite element study of elastic-plastic hemispherical contact against a rigid flat / R.L. Jackson, I. Green // Journal of Tribology. - 2005. - V. 127. - P. 343-354.

1. Pugachev, A.A. Control system for traction asynchronous motor with capacity loss minimization / A.A. Pugachev, V.I. Vorobiyov, A.S. Kosmoda-

1. miansky // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2015. - № 2 (46). - pp. 55-61.
2. Control system for traction electric drive with temperature control of heat-loaded elements / A.S.

- Kosmodamiansky [et al.] // *Electrical Engineering*. - 2014. - № 8. - pp. 38-43.
3. Yezhov, A.D. Definition of pair contact thermal resistance: C-Si-C composite and titanium alloy / A.D. Yezhov // *Proceedings of MAI*. - 2015. - № 82. - pp. 1-15.
 4. Grishchenko, A.V. Effectiveness increase in power semiconductor device cooling / A.V. Grishchenko, I.G. Kiselyov, A.S. Kornev, D.V. Krylov // *Electrical Engineering*. - 2016. - № 5. - pp. 32-36.
 5. Izmerov, M.A. Two-level model of engineering surface / M.A. Izmerov // *Young scientists achievements in development of innovation processes in economics, science, education: Proceedings of the V-th Inter. Scientific-Practical Conf.* / under the editorship of O.M. Golembiovskaya. - Bryansk: BSTU, 2013. - pp. 121-123.
 6. Tikhomirov, V.P. Contact interaction in fractal surfaces / V.P. Tikhomirov // *Friction and Wear*. - 1997. - Vol. 18. - № 3. - pp. 369-374.
 7. Chang, W. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces/ W. Chang, I. Etsion, D. Bogy // *Journal of Tribology*. - 1987. - V. 109. - P. 257-263.
 8. Potapov, A.A. Theory of wave scattering by fractal anisotropic surface / A.A. Potapov, A.V. Laktyunkin // *Nonlinear World*. - 2001. - Vol. 6. - № 6. - pp. 3-36.
 9. Tikhomirov, V.P. Adequacy of model and real surface / V.P. Tikhomirov, M.A. Izmerov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2012. - № 3. - pp. 64-71.
 10. Pavelescu, D. On the roughness fractal character, the tribological parameters and the error factors / D. Pavelescu, A. Tudor // *Proceedings of the Romanian Academy. Ser. A*. - 2004. - Vol. 5. - № 2.
 11. Jackson, R.L. A Finite element study of elastic-plastic hemispherical contact against a rigid flat / R.L. Jackson, I. Green // *Journal of Tribology*. - 2005. - V. 127. - P. 343-354.

Статья поступила в редколлегию 13.12.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Горленко О.А.

Сведения об авторах:

Тихомиров Виктор Петрович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-12, e-mail: dm-bgtu@yandex.ru.

Воробьев Владимир Иванович, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.

Измеров Михаил Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-

Tikhomirov Victor Petrovich, D. Eng., Prof., Head of the Dep. "Machine Parts", Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-12, e-mail: dm-bgtu@yandex.ru.

Vorobiyov Vladimir Ivanovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Rolling-Stock", Bryansk State Technical University, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.

Izmerov Mikhail Alexandrovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Machine Parts", Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-12.

12.

Стрекалов Николай Николаевич, ст. преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Московского государственного университета путей сообщения (РОАТ МИИТ), e-mail: strek79@list.ru.

Пугачев Александр Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-36-02, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru.

Strekalov Nikolay Nikolayevich, Senior Lecturer of the Dep. "Traction Rolling-Stock", Russian Open Academy of Transport of Moscow State University of Communications (ROAT of MSUC), e-mail: strek79@list.ru.

Pugachev Alexander Anatolievich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Electronic, Radio-electronic, and Electro-technical Systems", Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-36-02, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru.