

**Моделирование тепловых процессов в контактных зонах
тепловыделяющих элементов***В. С. Кондратенко, В. В. Кадомкин, О. Н. Третьякова*

На двух конкретных примерах рассмотрен общий подход в математическом моделировании тепловых процессов в контактных зонах тепловыделяющих элементов при разработке и оптимизации различных технологических процессов, систем и устройств. В первом примере рассмотрена математическая модель теплообмена в контактной зоне (металлогибридном термоинтерфейсе) между тепловыделяющим элементом и теплорассеивающим радиатором. Во втором случае рассмотрен и проанализирован тепловой процесс при обработке материалов связанным алмазным инструментом в контактной зоне «алмазное зерно – связующий материал – обрабатываемый материал». Общий подход в моделировании тепловых процессов в контактных зонах различных тепловыделяющих элементов позволяет оптимизировать параметры технологических режимов обработки и правильные условия эксплуатации изделий и систем.

Ключевые слова: расчет тепловых процессов; теплообмен; тепловыделяющий элемент; контактная зона, металлогибридный термоинтерфейс, связанный алмазный инструмент.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-83-92

Введение

В работе [1] рассматриваются различные технологические процессы, в разработке которых активно участвуют учёные школы профессора В. С. Кондратенко. Разработка и создание нового оборудования часто связаны с миниатюризацией продуктов и компонентов, а также с увеличением их энергоёмкости и

загруженности. Это требует разработки новых технологических процессов обработки новых материалов, а также разработки новой элементной базы, обеспечивающей оптимальные условия для вновь создаваемого оборудования. Конструкторы, разрабатывающие новые устройства и системы, не всегда полностью оценивают роль тепловых процессов, происходящих как при обработке материалов, так и при эксплуатации изделий, что зачастую приводит к разрушению и выходу из строя созданных устройств. Таким образом, в различных технологических процессах возникает необходимость в математическом моделировании температурных полей в заготовках и обрабатываемом инструменте, позволяющем рассчитывать температурные напряжения, деформации и взаимное расположение отдельных элементов системы.

Следует отметить, что особую, перво-степенную роль в процессах теплообмена в сложных многокомпонентных системах играют тепловые процессы в зонах контакта. Правильная оценка и оптимизация условий тепло-

Кондратенко Владимир Степанович¹, д.т.н., профессор.

E-mail: vsk1950@mail.ru

Кадомкин Виктор Викторович¹, к.т.н., доцент.

E-mail: vvkadomkin@yandex.ru

Третьякова Ольга Николаевна², к.ф.-м.н., доцент.

E-mail: tretiyakova_olga@mail.ru

¹ МИРЭА – Российский технологический университет. Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)».

Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4.

Статья поступила в редакцию 20 октября 2021 г.

© Кондратенко В. С., Кадомкин В. В., Третьякова О. Н., 2021

обмена в зонах контакта часто является решающим условием при разработке новых технологических процессов и обеспечении оптимальных условий эксплуатации.

Задача моделирования тепловых процессов в зонах контакта теплогенерирующих элементов и теплоотводящих устройств в режимах нестационарного распределения температуры в элементах технологической установки является сложной. Поэтому с учетом ограниченных вычислительных ресурсов для каждой рассматриваемой технологии часто используются упрощенные математические модели.

В этой статье мы покажем справедливость наших аргументов и утверждений на двух примерах для различных технологических процессов.

Моделирование тепловых процессов в контактной зоне «тепловыделяющий элемент – радиатор»

Для любой технологической установки составной частью системы охлаждения является термоинтерфейс – слой теплопроводящего состава в контактной зоне между охлаждаемой поверхностью тепловыделяющего элемента (ТВЭ) и отводящим тепло теплорассеивающим элементом (ТРЭ). Контактные площадки ТВЭ и ТРЭ выполняются, как правило, из металлов с высокой теплопроводностью и предполагается, что контактная зона между ними имеет малое термическое сопротивление. В реальной технике часто соприкасающиеся поверхности ТВЭ и ТРЭ не обеспечивают необходимого теплового контакта, что и приводит к перегреву тепловыделяющего элемента. С целью улучшения эффективности теплоотвода разработан новый тип металлгибридных термоинтерфейсов (МГТИ) [2–4], для которых проведено математическое моделирование процесса теплообмена в контактной зоне [5, 6].

Металлгибридный термоинтерфейс представляет собой каркас из двух тонких металлических перфорированных пластин, пространство между которыми заполнено тонким слоем теплопроводящей пасты. Преимущества МГТИ по сравнению с традиционными видами термоинтерфейсов: высокая теплопроводность, надежность и долговечность работы, возможность автоматизации

процесса монтажа и демонтажа, низкая себестоимость, производство в России, что может обеспечить импортозамещение.

Для оценки эффективности МГТИ были произведены его теоретические и экспериментальные исследования, проведена оценка эффективности охлаждения тепловыделяющего элемента, к качеству которого был выбран процессор *Intel i7* мощности 165 Вт, который имеет площадь контактной зоны для охлаждения $0,00141 \text{ м}^2$, что соответствует плотности теплового потока 117000 Вт/м^2 .

Для моделирования теплоотвода использовалась упрощенная физическая модель, где МГТИ представлен слоистой структурой с различными теплофизическими свойствами [5], что сводило анализ теплообмена к решению краевой задачи теплопроводности с граничными условиями первого или второго рода с учетом конвективного теплообмена на поверхности радиатора. Плотность тепловых потоков при внешнем охлаждении радиатора определяется коэффициентом теплоотдачи ТРЭ, средним значением температуры охлаждаемой поверхности, температурой охлаждающей среды. За счет развитой внешней поверхности ТРЭ, выбора условий обтекания и параметров охлаждающей среды удастся достичь существенного снижения температуры ТРЭ в контактной зоне ТВЭ и ТРЭ. Отдельно следует рассмотреть и сравнить тепловые процессы для традиционных термоинтерфейсов и МГТИ.

Рассмотрим МГТИ, состоящий из двух слоев перфорированной фольги и термопасты, заполняющей контактную зону «ТВЭ–ТРЭ» [6]. Перепад температуры при отводе тепла от ТВЭ к ТРЭ, т. е. на термоинтерфейсе определяется выражением вида

$$\Delta T = \frac{\delta_{mi} q}{\lambda_{mi}} \quad (1)$$

или через выражение термического сопротивления R_{mi} :

$$\Delta T = R_{mi} q,$$

где δ_{mi} , λ_{mi} , q – толщина слоя термоинтерфейса, коэффициент теплопроводности материала термоинтерфейса, поверхностная плотность теплового потока соответственно.

Учитывая соотношение габаритных размеров МГТИ можно рассматривать рабочие процессы в МГТИ, как протекающие в многослойной плоской стенке. Тогда термическое сопротивление МГТИ равно

$$R_{\text{МГТИ}} = \frac{\delta_{mn_1} + \delta_{mn_2} + \delta_{mn_3}}{\lambda_{mn}} + \frac{\delta_{M_1}}{\lambda_{M_1}} + \frac{\delta_{M_2}}{\lambda_{M_2}}$$

где δ_{M_1} , λ_{M_1} – толщина и коэффициент теплопроводности первого листа металлической фольги МГТИ; δ_{M_2} , λ_{M_2} – толщина и коэффициент теплопроводности второго листа металлической фольги МГТИ; δ_{mn_1} , δ_{mn_2} , δ_{mn_3} – толщина слоя термопасты между ТВЭ и первым листом фольги, между двумя слоями металлической фольги МГТИ и между вторым листом фольги и ТРЭ, λ_{mn} – коэффициент теплопроводности термопасты.

Перепад температуры на МГТИ при работе ТВЭ будет равен

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = R_{\text{МГТИ}} q,$$

или

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = \left(\frac{\delta_{mn_1} + \delta_{mn_2} + \delta_{mn_3}}{\lambda_{mn}} + \frac{\delta_{M_1}}{\lambda_{M_1}} + \frac{\delta_{M_2}}{\lambda_{M_2}} \right) q.$$

Сравнение экспериментальных данных с расчетными данными температуры тепловы-

деляющего элемента и радиатора, полученных для 3D-модели методом конечных элементов и для модели многослойной плоской стенки, показало их совпадение с точностью до 0,1 °С. На рис. 1 представлены данные распределения температуры по толщине стандартного термоинтерфейса с термопастой Arctic Silver 5 и МГТИ с медной и алюминиевой фольгой толщиной 0,15 мм при общей толщине термоинтерфейсов 0,35 мм.

Для оценки эффективности МГТИ выполним сравнение перепада температуры на типовых термоинтерфейсах $\Delta T_{\text{ми}}$ и МГТИ $\Delta T_{\text{МГТИ}}$ при одинаковом значении толщины интерфейса $\delta_{\text{МГТИ}} = \delta_{mn_1} + \delta_{mn_2} + \delta_{mn_3} + \delta_{M_1} + \delta_{M_2} = \delta_{\text{ми}}$:

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = \left(\frac{\delta_{mn_1} + \delta_{mn_2} + \delta_{mn_3}}{\lambda_{mn}} + \frac{\delta_{M_1}}{\lambda_{M_1}} + \frac{\delta_{M_2}}{\lambda_{M_2}} \right) q,$$

$$\Delta T_{\text{ми}} = \frac{\delta_{\text{ми}}}{\lambda_{\text{ми}}} q.$$

а их отношение позволяет определить коэффициент эффективности МГТИ, который равен

$$K_{\text{eff}} = \frac{\delta_{\text{МГТИ}} / \lambda_{mn}}{(\delta_{mn_1} + \delta_{mn_2} + \delta_{mn_3}) / \lambda_{mn} + \delta_{M_1} / \lambda_{M_1} + \delta_{M_2} / \lambda_{M_2}}.$$

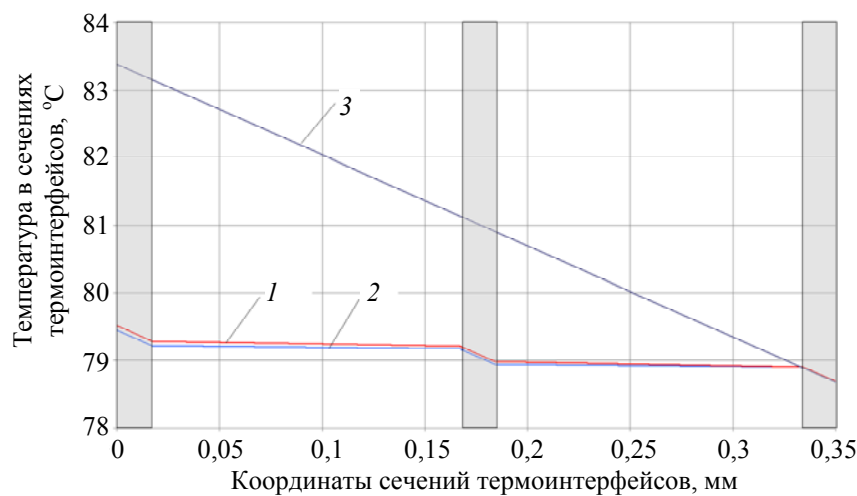


Рис. 1. Сравнение распределения температуры в системе охлаждения процессора Intel Core i7 при одинаковой толщине теплопроводящего слоя: при использовании термопасты Arctic Silver 5 (3); МГТИ с каркасом из алюминия и термопастой Arctic Silver 5 (1), МГТИ с каркасом из меди и термопастой Arctic Silver 5 (2).

На рис. 2 представлены расчетные данные о распределении температуры в системе охлаждения цифровых сигнальных процессоров приёмопередающих устройств ВОЛС компании Т8 с традиционным термоинтерфейсом КПТД-М и металлогибридным термо-

интерфейсом, которые показывают существенное уменьшение тепловой нагрузки сигнальных процессоров при использовании МГТИ, за счет снижения температуры на 18–19 °С, что и было подтверждено экспериментально (рис. 3).

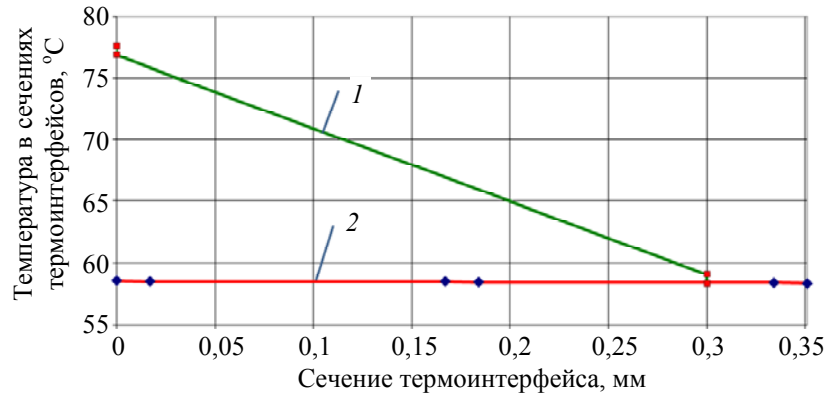


Рис. 2. Изменение температура в сечениях термоинтерфейсов: 1 – типовой термоинтерфейс КПТД-М; 2 – МГТИ с медной фольгой, толщиной 0,15 мм и пастой Arctic Silver 5.

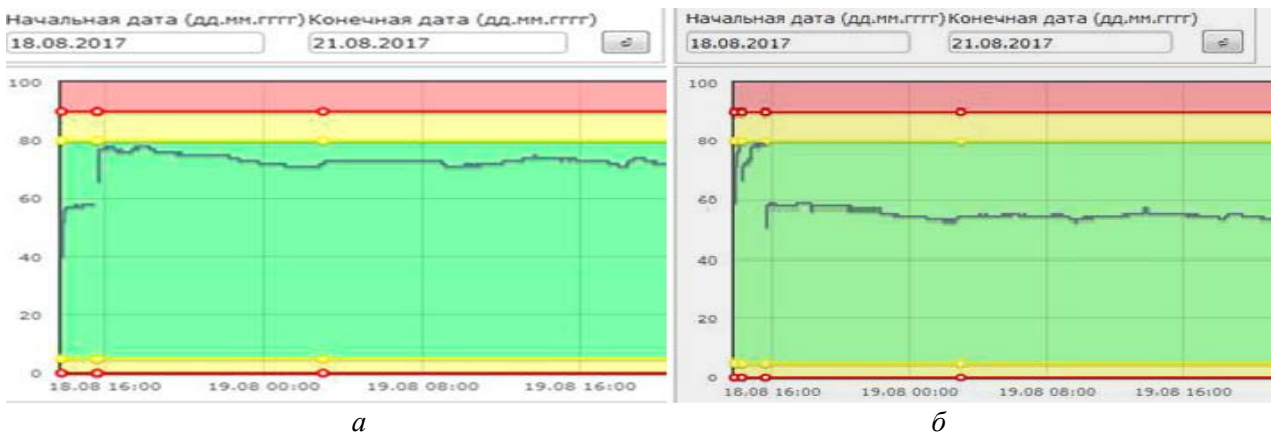


Рис. 3. Графики изменения температуры при эксплуатации процессоров с типовым термоинтерфейсом КПТД-М (а) и МГТИ с медной фольгой и пастой Arctic Silver 5 (б).

Выводы 1: В результате проведенных экспериментальных исследований и математического моделирования тепловых процессов в контактной зоне «тепловыделяющий элемент – радиатор»:

- получены расчетные и экспериментальные данные об эффективности МГТИ, подтверждающие перспективность его применения;
- рассмотрены основные параметры, влияющие на эффективность термоинтерфейсов. Установлено, что эффективность МГТИ от 6 до 10 раз превышает эффективность традиционных термоинтерфейсов [5, 6];

- получены зависимости между основными параметрами термоинтерфейса, позволяющие проводить инженерные расчеты при создании МГТИ с заданными теплофизическими характеристиками.

Моделирование тепловых процессов в контактной зоне «алмазное зерно – связующий материал – обрабатываемый материал» в связанном алмазно-абразивном инструменте

Решение стационарных и нестационарных задач теплопроводности совместно с

прочностными задачами рассмотрены на примере разработки математических моделей рабочих процессов в связанном алмазно-абразивном инструменте (СААИ), который используется для шлифования и полирования разнообразных материалов. Применение СААИ по сравнению со свободным абразивом в виде суспензий или паст приводит к увеличению производительности процессов шлифования и полирования, уменьшению расхода абразива, повышению культуры производства и экологической чистоты [7]. Инструменты на органических связках являются наиболее технологичными и широко применяются как для шлифования, так и для полирования материалов, обеспечивая при этом высокое качество обработки. Однако для реализации указанных выше преимуществ СААИ требуется специальный выбор характеристик материалов, используемых в данном инструменте, к которым относятся:

- геометрические размеры зерен абразива и их концентрация в связующем материале в составе инструменте;
- прочностные характеристики зерен абразива;
- коэффициенты теплопроводности обрабатываемого материала, абразива и связующего материала в составе инструмента;
- прочностные характеристики связующего материала в составе инструмента и их зависимость от температуры.

Экспериментальная отработка СААИ для его последующего эффективного применения из-за влияния на технологические процессы разнообразных влияющих факторов является чрезвычайно затратной, а некорректный выбор параметров инструмента при его использовании приводит к явлению «засаливания» инструмента и уменьшению производительности технологического процесса.

Основной причиной «засаливания» алмазного инструмента является повышение температуры связующего материала под поверхностью зерен абразива в зоне резания до значений, при которых зерна алмаза под действием сил давления «выдавливаются» в связку без потери механической связи или имеет место деструкция органической связки с разрушением механической связи зерна алмаза с материалом связки. Высота выступающей над

рабочей поверхностью инструмента части зерна абразива уменьшается до неприемлемого в технологическом процессе значения, т. е. имеет место потеря режущей способности инструмента.

В работах [8, 9] сформированы математические модели тепловых процессов в связанном алмазно-абразивном инструменте и получены решения тепловой задачи как для стационарного, так и для нестационарного режимов, что позволяет определить условия обеспечения эффективной работы абразивных зерен в составе инструмента в зависимости от их геометрических размеров и концентрации, теплофизических свойств связующего материала и получить инструменты с заданным набором технологических свойств.

На рабочей поверхности инструмента (передний торец) выделяются отдельные фрагменты, содержащие по одному зерну алмаза и на них, как на основаниях, строятся **объемные элементы (ОЭ)** с параллельной системой боковых границ, а их совокупность формирует алмазный инструмент. Температурные поля в ОЭ вокруг алмазных зерен формируются по законам близким к гиперболическим, где температура нагрева связки резко уменьшается при удалении от алмазного зерна. Это позволяет выполнять расчеты рабочих процессов в ОЭ цилиндрической формы, площадь основания которых как определяется как отношение площади рабочей поверхности СААИ к числу алмазов на поверхности. При этом размеры СААИ в осевом направлении существенно больше среднего расстояния между отдельными алмазами.

В зоне контакта алмазные зерна с обрабатываемым материалом выделяется тепло, которое и определяет состояние СААИ. Полученное алмазным зерном тепло приводит к его нагреву и формированию в ОЭ нестационарных температурных полей с последующим переходом к стационарным температурным полям. Охлаждение ОЭ выполняется за счет отвода тепла в держатель СААИ и подачи охлаждающей жидкости.

Основные расчеты СААИ выполнялись для инструментов на органической связке на основе вспененной эпоксидной смолы плотностью 650 кг/м^3 , коэффициентом теплопроводности $0,59 \text{ Вт/(м К)}$, удельной теплоем-

костью 1600 Дж/(кг К) при массовой концентрации алмазных зёрен менее 5 % и средним размером алмазного зерна 100 мкм. Для алмазных зерен принимались следующие значения параметров: плотность 3500 кг/м³, коэффициент теплопроводности 2000 Вт/(м К), удельная теплоемкость 550 Дж/(кг К). При указанных данных размер зерна алмаза существенно меньше как продольного, так поперечного размера ОЭ.

Учитывая численные значения параметров используемых материалов СААИ и геометрические размеры СААИ, тепловые процессы в них после начала процесса обработки материала рассматриваются как последовательность трех отдельных стадий в различных фрагментах ОЭ, для которых характерные времена отличаются на порядок и более. Это позволяет выделить для выполнения расчетов три отдельные подсистемы и рабочие процессы в них:

- **алмазное зерно**, тепловые процессы в котором можно считать квазистационарными;
- **связка в зоне переднего торца ОЭ**: нагрев обеспечивается за счет контакта с поверхностью алмазного зерна; нестационарные тепловые процессы имеют характерные времена порядка нескольких секунд. После формирования температурного поля, соответствующего стационарному полю с гиперболическим законом, тепловой процесс можно считать квазистационарным с изменением во времени значения температуры на границе зоны переднего торца ОЭ;

- **связка в основной зоне ОЭ**: нагрев обеспечивается за счет потока тепла от связки в зоне переднего торца контакта, а охлаждение за счет отвода тепла в металлический держатель; нестационарные тепловые процессы имеют характерные времена порядка 100 секунд и более.

Температуры алмазного зерна определяются балансом тепла в форме дифференциального уравнения

$$m_d c_d \frac{dT_d}{dt} = Q_1 - q_d(t) S_{\text{пов}},$$

где T_d , m_d , $q_d(t)$, $S_{\text{пов}}$, Q_1 , c_d – температура алмаза, масса алмаза, поверхностная плотность теплового потока по внешней поверхности алмаза, площадь контакта алмазного зерна и

связки, тепловой поток в алмазное зерно из зоны контакта с обрабатываемым материалом, удельная теплоемкость алмаза.

Для упрощения расчетов принималась сферическая форма зерна алмаза с радиусом r_d , что позволяет рассчитывать тепловые процессы в зоне переднего торца ОЭ в сферических координатах. Задача теплопроводности в зоне переднего торца ОЭ в стационарном режиме имеет решение в аналитической форме, если алмазное зерно погружено в связку на величину радиуса. Влиянием связки основной зоны ОЭ СААИ на начальных стадиях тепловых процессов в зоне контакта «алмазное зерно – связка» можно пренебречь, что обеспечивается соотношением размеров алмазного зерна и поперечных размеров ОЭ и видом закона изменения температуры в сфере (полусфере).

Изменение температуры в зоне переднего торца по мере его прогрева определяется на нестационарном режиме дифференциальным уравнением теплопроводности в сферических координатах [8–10], а после установления стационарного режима в сечении на расстоянии r от центра алмаза температура определяется уравнением вида

$$T(r) = T_2 + \frac{Q_1}{2\pi\lambda_c} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_c} \right),$$

где T_2 – температура на границе зоны переднего торца и остальной части ОЭ; λ_c – коэффициент теплопроводности связки; r_c – радиус ОЭ.

Для определения температурного поля значение теплового потока в единичное алмазное зерно Q_1 было определено экспериментально по результатам измерений выделяемой при шлифовании мощности и составило 0,0165 Вт. Несмотря на малое значение выделяемой мощности из-за малых размеров алмазных зерен в контактной зоне «алмазное зерно – связка» тепловые потоки достигают значений 1000 кВт/м² и более, что приводит к формированию в зоне переднего торца температурных полей со значительными градиентами.

Численные расчеты показывают несущественное влияние поперечных размеров образца на значения температурных полей в зоне переднего торца, что и служит основани-

ем для возможности применения расчетной модели с полусферической зоной переднего торца.

После прогрева зоны переднего торца обеспечивается передача теплового потока в оставшуюся часть ОЭ и формированию в ней температурных полей с характерными временами порядка нескольких минут. Поперечные размеры ОЭ существенно меньше продольных размеров ОЭ. Это позволило рассматривать основную часть инструмента как плоскую стенку, а переход от полусферической зоны переднего торца со сферическим температурным полем к плоской стенке с одномерным температурным полем выполнить путем введения поправочного коэффициента k , значение которого близко к 1.

Тогда приближенное значение температуры на границе зоны переднего торца определяется уравнением

$$T(r) = T_{\text{охл}} + \frac{Q_1(L - kr_c)}{\lambda_c \pi r_c^2},$$

где $T_{\text{охл}}$ – температура СААИ в месте крепления; L – высота СААИ.

Полученное уравнение позволяет найти температуру связки в области переднего торца при стационарном режиме работы

$$T(r) = T_{\text{охл}} + \frac{Q_1(L - kr_c)}{\lambda_c \pi r_c^2} + \frac{Q_1}{2\pi\lambda_c} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_c} \right).$$

Представленный метод расчета позволяет найти приближенные значения температурных полей в зоне переднего торца шлифовального инструмента в различные периоды работы инструмента, оценить термическую стабильность материала связки в месте крепления алмазного зерна. Аналитическая форма уравнений для температурных полей позволяет оценить влияние различных параметров инструмента на тепловые процессы и эксплуатационные характеристики инструмента.

На рис. 4 показаны результаты расчетов температурных полей в СААИ для различных размеров алмазных зерен и неизменных значениях тепловых потоков к алмазным зернам без применения охлаждаемой жидкости. Расчеты показывают, что алмаз и прилегающий к нему связующий материал нагреваются до температуры 100 °С и более при использовании алмазов размерами 60 мкм и менее, что приводит к потере связующим материалом своих прочностных свойств. Под действием внешних сил происходит деформация связки под алмазными зернами и обеспечивается пространственное смещение алмазных зерен в связующий материал инструмента.

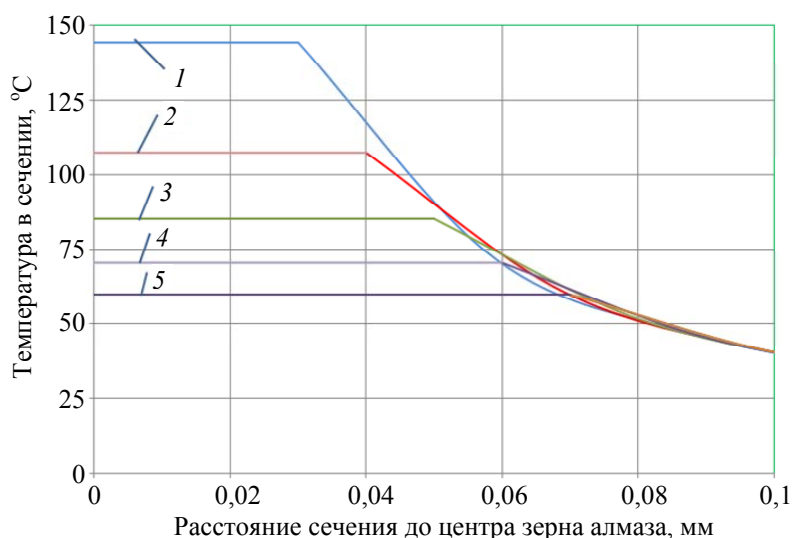


Рис. 4. Влияние размеров алмазного зерна температурного поля в зоне переднего торца при стационарном режиме работы инструменте (1 – радиус алмазное зерно 30 мкм; 2 – 40 мкм; 3 – 50 мкм; 4 – 60 мкм; 5 – 70 мкм).

Однако после смещения алмазных зерен увеличивается площадь контакта «алмаз-связка» и уменьшается значение поверхностной плотности тепловых потоков, что приводит к уменьшению температуры прилегающего к алмазному зерну слоя связки с воз-

можностью обеспечения последующей фиксации алмазных зерен в связке [8, 9] с увеличенной глубиной погружения. При некоторых значениях параметров инструмента имеет место полное погружение алмаза в связку, и инструмент теряет свои режущие свойства.

Учитывая, что алмазные зерна могут иметь различное исходное положение алмазов в связке, и их положение может изменяться в процессе эксплуатации инструмента, то следует дополнительно оценить значения температурных полей при произвольной глубине погружения алмазных зерен в связку. Для этого была выполнена оценка температурных полей при произвольном погружении алмаза в компаунд.

Расчетные соотношения для температурных полей были получены для модели при погружении алмазного зерна в связку на глубину, равную радиусу, и могут быть записаны в следующей форме:

$$T(r) = T_2 + \frac{Q_1}{2\pi\lambda_c} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_c} \right) = T_2 + \frac{Q_1}{\Omega_{\text{пов}}\lambda_c} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_c} \right),$$

где $\Omega_{\text{пов}} = 2\pi$ – значение телесного угла для поверхности контакта алмазного зерна со связкой. При этом отношение $Q_1/2\pi$ определяет плотность теплового потока по телесному углу. Тогда при погружении алмазного зерна на произвольную глубину x площадь контактной зоны алмаза с компаундом определяется линейным законом $S_{\text{пов}} = 2\pi r_d x$, что позволяет определить значение телесного угла поверхности контакта с алмазным зерном

$$\Omega_{\text{пов}} = \frac{S_{\text{пов}}}{r_d^2} = \frac{2\pi x}{r_d},$$

а для определения значения температуры связки в зоне контакта с алмазом получим уравнение

$$T(r) = T_2 + \frac{Q_1}{2\pi\lambda_c x/r_d} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_c} \right).$$

Расчеты температурных полей (рис. 5) показывают, что если при погружении в связку на один радиус температура нагрева на поверхности алмазного зерна равна 85°C при условии охлаждения инструмента СОЖ, то для алмазных зерен с глубиной погружения на $2/3$ радиуса температура увеличивается на 50 % и достигает 128°C . При более глубоком погружении (на $4/3$ радиуса алмазного зерна) температура уменьшается на 25 % и равна 64°C . Аналогичные данные на стационарном режиме шлифования без охлаждения инструмента температура нагрева на поверхности алмазного зерна равна 125°C при погружении алмазного зерна на один радиус, а при уменьшенной глубине погружения ($2/3$ радиуса) температура увеличивается до 168°C , в то время как после дополнительного погружения алмазного зерна ($4/3$ радиуса) температура уменьшается до 105°C .

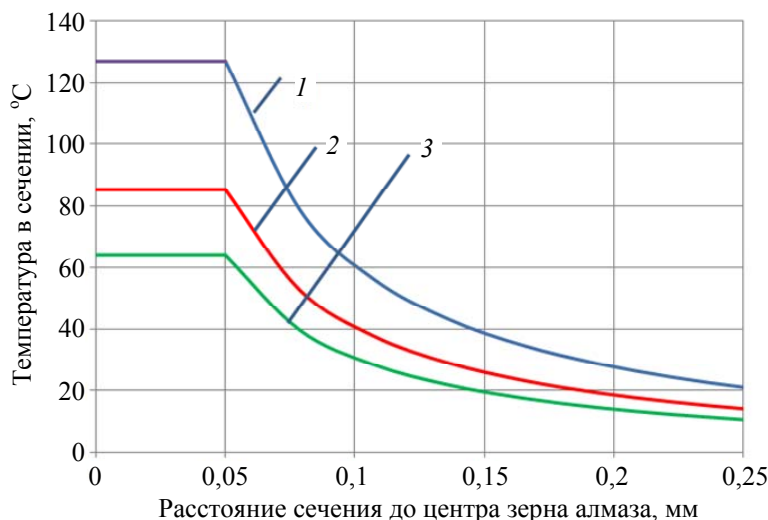


Рис. 5. Изменение температурного поля в зоне переднего торца алмаза радиусом 50 мкм охлаждаемого САИИ в зависимости от расстояния сечения до центра алмаза и глубины погружения зерна алмаза в связку: 1 – погружение на $2/3$ радиуса; 2 – погружение на радиус; 3 – погружение на $4/3$ радиуса зерна.

Для САИИ используются алмазные зерна с низкой прочностью, и при их разрушении в процессе эксплуатации инструмента образуются несколько фрагментов алмазных зерен меньших размеров. Структура пеноэпоксид-

ного связующего материала имеет развитую за счет пор внешнюю поверхность, что обеспечивает возможность фиксации полученных при разрушении фрагментов алмазных зерен в поверхностном слое связки. Таким образом,

количественная концентрация алмазных зерен на внешней поверхности инструмента увеличивается при уменьшении геометрических размеров зерен. Это в свою очередь обеспечивает:

- повышение механических нагрузок на оставшиеся алмазные зерна начального размера, что приводит к их разрушению в процессе обработки;
- нарушение теплового баланса в контактной зоне «алмазное зерно – связующий материал» и увеличение температуры оставшихся на поверхности алмазных зерен с их последующим погружением вглубь материала связки;
- формирование на поверхности инструмента алмазных зерен с уменьшенным средним размером и увеличенной концентрацией;
- увеличение точности обработки материала и уменьшение шероховатости поверхности.

Выводы 2: Разработанные математические модели и расчеты рабочих процессов в контактной зоне «алмазное зерно – связка – обрабатываемый материал» позволили:

- оптимизировать требования к теплофизическим и упруго-эластичным свойствам связки при проектировании инструментов и определить их оптимальные значения;
- определить требования к прочностным характеристикам алмазных порошков и вспомогательным абразивам, а также оптимизировать их размеры и концентрацию;
- оптимизировать химико-механический процесс шлифования и полирования за счет применения специальных составов смазочно-охлаждающей жидкости;
- использование инструментов на основе разработанного пеноэпоксидного связующего позволило уменьшить до 10 раз глубину трещиноватого слоя и уменьшить до 10 раз шероховатость поверхности [8–10].

Заключение

Выполненные в работе исследования по моделированию и анализу процессов теплообмена в контактных зонах тепловыделяющих элементов позволяют сделать следующие выводы. Расчет тепловых процессов в контактных зонах различных тепловыделяющих элементов, которые подвергаются температурным нагрузкам в процессе обработки материалов при изготовлении изделий или их эксплуатации, позволяют правильно выбрать диапазон допустимых технологических и эксплуатационных режимов и избежать наступления критических условий, приводящих к выходу из строя эксплуатируемого устройства и всей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратенко В. С., Третьякова О. Н. Проблемы создания новых лазерных технологий. Монография. – М.: Изд-во МАИ, 2018. – 160 с.
2. Сакуненко Ю. И., Кондратенко В. С. Устройство отвода тепла от тепловыделяющих элементов // Патент № 2015129660 (РФ). 21.07.2015.
3. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. // Полупроводниковая светотехника. 2015. № 6. С. 72.
4. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И., Высоканов А. А. // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 85.
5. Кондратенко В. С., Высоканов А. А., Сакуненко Ю. И., Третьякова О. Н., Молотков А. А., Тикменов В. Н. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 166.
6. Кудж С. А., Кондратенко В. С., Кадомкин В. В., Высоканов А. А. // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 347.
7. Кондратенко В. С. // Стекло и керамика. 2018. № 5. С. 39.
8. Кондратенко В. С., Кадомкин В. В. // Стекло и керамика. 2018. № 11. С. 13.
9. Кудж С. А., Кондратенко В. С., Кадомкин В. В. // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 5. С. 81.
10. Кондратенко В. С., Кадомкин В. В., Третьякова О. Н. // Материалы XXII Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021). (4–13 сентября 2021 г. Алушта, Крым).

Modeling of thermal processes in the contact zones of fuel elements

V. S. Kondratenko¹, V. V. Kadomkin¹, and O. N. Tretiyakova²

¹ MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
E-mail: vsk1950@mail.ru

² Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia

Received October 25, 2021

In this work, using two specific examples, a general approach to the mathematical modeling of thermal processes in the contact zones of fuel elements in the development and optimization of various technological processes, systems and devices is considered. In the first example, a mathematical model of heat transfer in the contact zone (metal-hybrid thermal interface) between the heat-generating element and the heat-dissipating radiator is considered. In the second case, the thermal process in the processing of materials with a bonded diamond tool in the contact zone "diamond grain – binder – processed material" is considered and analyzed. The general approach to modeling thermal processes in the contact zones of various fuel elements makes it possible to optimize the parameters of technological processing modes and the correct operating conditions for products and systems.

Keywords: calculation of thermal processes; heat exchange; fuel element; contact area, metal-hybrid thermal interface, bonded diamond tool.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-83-92

REFERENCES

1. V. S. Kondratenko and O. N. Tretiyakova, *Problems of creating new laser technologies*. Monograph. (Publishing House of MAI, Moscow, 2018). p. 160.
2. Yu. I. Sakunenko and V. S. Kondratenko, Heat removal device from heat-generating elements. Patent No. 2015129660 (RF). 21.07.2015.
3. V. S. Kondratenko and Yu. I. Sakunenko, Semiconductor lighting engineering, No. 6, 72 (2015).
4. V. S. Kondratenko, Yu. I. Sakunenko, and A. A. Vysokanov, Applied Physics, No. 1, 85 (2017) [in Russian].
5. V. S. Kondratenko, A. A. Vysokanov, Yu. I. Sakunenko, O. N. Tretiyakova, A. A. Molotkov, and V. N. Tikmenov, Usp. Prikl. Fiz. **6** (2), 166 (2018).
6. S. A. Kudzh, V. S. Kondratenko, V. V. Kadomkin, and A. A. Vysokanov, News of higher educational institutions. Electronics **25** (4), 347 (2020).
7. V. S. Kondratenko, Glass and ceramics, No. 5, 39 (2018).
8. V. S. Kondratenko and V. V. Kadomkin, Glass and ceramics, No. 11, 13 (2018).
9. S. A. Kudzh, V. S. Kondratenko, and V. V. Kadomkin, Optical Journal **87** (5), 81 (2020).
10. V. S. Kondratenko, V. V. Kadomkin, and O. N. Tretiyakova, in *Proc. XXII International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS'2021)* (September 4–13, 2021 Alushta, Crimea).