

Машиностроение

УДК 621.892

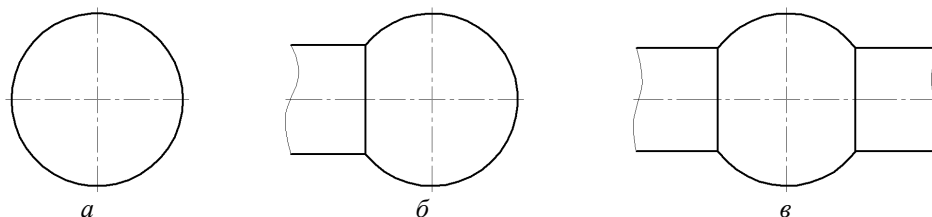
Д.С. Горяинов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассматриваются вопросы расчета рациональных режимов шлифования сферических поверхностей деталей. Установлено, что существенное влияние на процесс сферошлифования оказывает отношение частот вращения заготовки и инструмента. Даны практические рекомендации по управлению процессом сферошлифования.

Эффективность применения абразивных инструментов на операциях шлифования зависит, как известно, от многих технологических факторов. Широкие возможности управления технологическим процессом шлифования, наряду с низкими затратами на реализацию, заключаются в подборе рациональных режимов обработки и в обеспечении требуемого качества поверхности [1,2].

Детали, имеющие сферические поверхности, можно разделить на группы.



Р и с. 1. Типы деталей со сферическими поверхностями

Первая группа включает детали, у которых сферу можно беспрепятственно обработать со всех сторон (рис. 1, а). Сюда относятся шарики шарикоподшипников, пробки шаровых кранов с отделяющимся штоком и т.п.

Ко второй группе можно отнести детали, которые с одной стороны сферы имеют конструктивный элемент, препятствующий подводу инструмента (рис. 1, б). Представители этой группы деталей – шаровые пальцы.

К третьей группе можно отнести детали, у которых имеются конструктивные элементы с двух противоположных сторон сферической поверхности. У таких деталей обработке подлежит только часть сферы (рис. 1, в). К таким деталям относятся пробки шаровых кранов.

Сферы пробок являются наиболее ответственными и нагруженными деталями в шаровых кранах. Поэтому они изготавливаются из прочных, нержавеющей коррозионно-стойких сплавов на основе железа, никеля, хрома. Сферическая поверхность пробки обуславливает повышенные требования к точности формы и расположения, все это вызывает необходимость применения в завершающей стадии технологического процесса операций окончательной обработки.

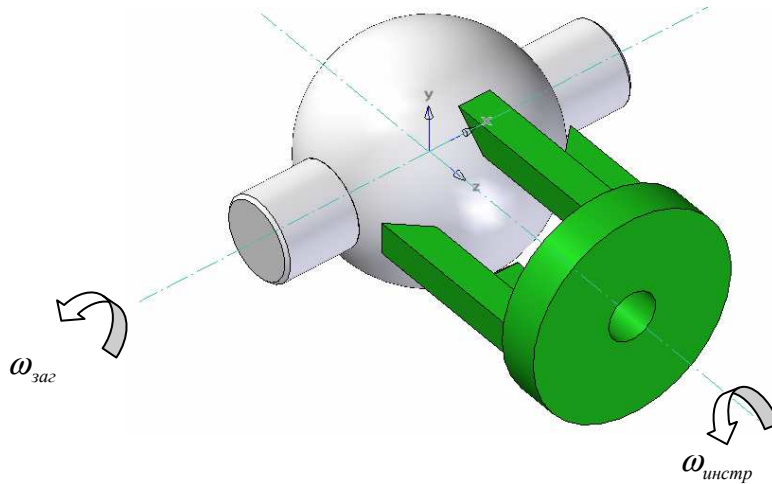
Абразивная обработка деталей этих групп производится различными вариантами. Обработка деталей группы а в основном производится простыми высокопроизводительными методами, при которых деталь находится в незакрепленном состоянии (обработка шариков шарикоподшипников).

Для обработки сферических поверхностей группы б небольшого диаметра широко применяется врезное шлифование фасонным абразивным кругом с применением профильной правки [6]. Этот метод позволяет получать высокую точность формы и шероховатость поверхности до Ra 0,63...0,32. Данный метод неприменим для обработки сфер большого диаметра.

Для абразивной обработки сфер различного диаметра на предварительных и окончательных операциях используется обработка абразивными брусками с применением сложного относительного движения заготовки и брусков [6]. При этом методе обработки ось вращения абразивного инструмента перпендикулярна оси вращения заготовки. Метод позволяет выполнять шлифование сферических поверхностей различного диаметра и получать высокую точность формы и шероховатость.

Разработаны геометрические модели тел заготовки и инструмента и модель процесса движения тел в процессе обработки. Разработка геометрических моделей проведена в программе Solid Works. По результа-

там определены вид и размеры обрабатываемой поверхности, а также положение пятна контакта заготовки и инструмента при обработке.



Р и с. 2. Схема движения инструмента и заготовки при шлифовании сферы шарового крана

Заготовка в процессе обработки вращается вокруг оси X (рис. 2) с угловой скоростью $\omega_{заг}$; абразивная головка, состоящая из четырех абразивных брусков, - вокруг оси Y с угловой скоростью $\omega_{инстр}$. Частота вращения заготовки может изменяться от 20 до 800 об/мин с шагом в 1 об/мин. При этом частота вращения абразивной головки может изменяться в пределах 20, 200, 400, 800 об/мин. Поверхность обработки представляет собой сферу, усеченную с двух противоположных сторон на равную величину. В сфере имеется сквозное отверстие.

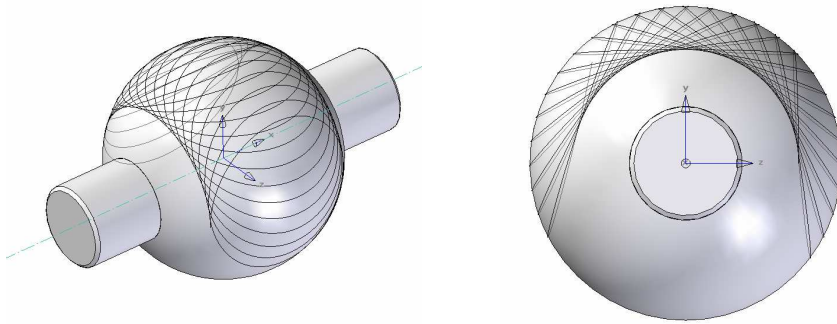
Определены уравнения траектории движения точки единичного абразивного зерна в процессе обработки. Траектория описана уравнением вращения точки вокруг двух взаимно перпендикулярных осей в декартовой системе координат с различными угловыми скоростями (1). В результате анализа траектории сделан вывод, что она представляет собой циклоиду, наложенную на сферу [3,4].

$$\begin{cases} x = R_{сф} \cdot \cos(\omega_{заг} \cdot t) - R_{обр} \cdot \sin(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \sin(\omega_{заг} \cdot t); \\ y = R_{сф} \cdot \sin(\omega_{заг} \cdot t) + R_{обр} \cdot \sin(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \cos(\omega_{заг} \cdot t); \\ z = R_{обр} \cdot \cos(\omega_{инстр} \cdot t), \end{cases} \quad (1)$$

где x, y, z – координаты точки, м; $R_{сф}$ - радиус сферы заготовки, м; $R_{обр}$ - расстояние от вершины абразивного зерна до оси вращения абразивной головки, м; $\omega_{заг}$ - угловая скорость вращения заготовки, c^{-1} ; $\omega_{инстр}$ - угловая скорость вращения инструмента (абразивной головки), c^{-1} ; t – время, сек.

Дифференцируя эту систему уравнений по времени, получим выражение для нахождения проекций скоростей.

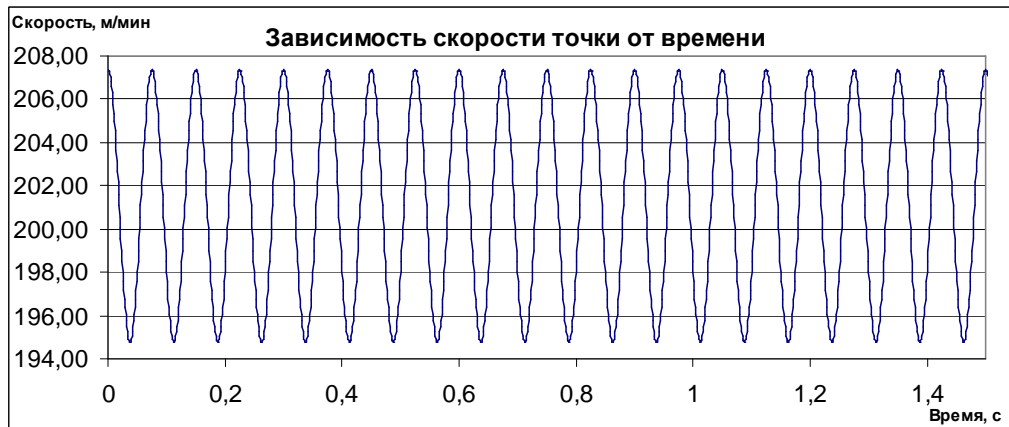
$$\begin{cases} V_X = -R_{сф} \cdot \omega_{заг} \cdot \sin(\omega_{заг} \cdot t) - R_{обр} \cdot \omega_{инстр} \cdot \cos(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \sin(\omega_{заг} \cdot t) - \\ - R_{обр} \cdot \omega_{заг} \cdot \sin(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \cos(\omega_{заг} \cdot t); \\ V_Y = R_{сф} \cdot \omega_{заг} \cdot \cos(\omega_{заг} \cdot t) + R_{обр} \cdot \omega_{инстр} \cdot \cos(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \cos(\omega_{заг} \cdot t) - \\ - R_{обр} \cdot \omega_{заг} \cdot \sin(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \sin(\omega_{заг} \cdot t); \\ V_Z = -R_{обр} \cdot \omega_{инстр} \cdot \sin(\omega_{инстр} \cdot t). \end{cases} \quad (2)$$



Р и с. 3. Вид фрагмента траектории движения точки по поверхности сферы

Соответственно, результирующая скорость будет равна геометрической сумме скоростей проекций:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} . \quad (3)$$



Р и с. 4. Изменение скорости при вращении точки вокруг двух осей. Параметры движения – $n_{инстр} = 800$ об/мин, $n_{заг} = 20$ об/мин

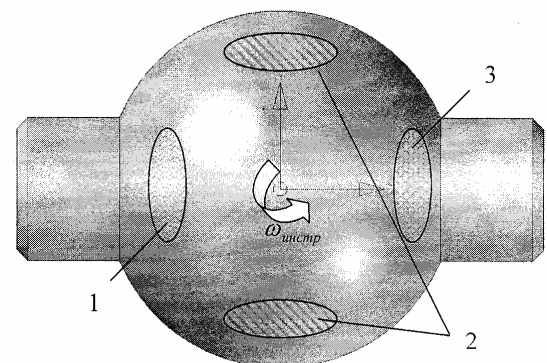
При шлифовании крупногабаритных сфер пробок, когда в движении находятся значительные массы металла и возникают значительные инерционные нагрузки, необходимо иметь данные об ускорениях. Дифференцируя систему уравнений (2) по времени, получим выражение для нахождения проекций ускорений на оси координат.

$$\begin{cases} a_x = -R_{сф} \cdot \omega_{заг}^2 \cdot \cos(\omega_{заг} \cdot t) + (R_{обр} \cdot \omega_{инстр}^2 + R_{обр} \cdot \omega_{заг}^2) \cdot \sin(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \sin(\omega_{заг} \cdot t) - \\ - 2 \cdot R_{обр} \cdot \omega_{инстр} \cdot \omega_{заг} \cdot \cos(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \cos(\omega_{заг} \cdot t); \\ a_y = -R_{сф} \cdot \omega_{заг}^2 \cdot \sin(\omega_{заг} \cdot t) - (R_{обр} \cdot \omega_{инстр}^2 + R_{обр} \cdot \omega_{заг}^2) \cdot \sin(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \cos(\omega_{заг} \cdot t) - \\ - 2 \cdot R_{обр} \cdot \omega_{инстр} \cdot \omega_{заг} \cdot \cos(\omega_{инстр} \cdot t) \cdot \sin(\omega_{заг} \cdot t); \\ a_z = -R_{обр} \cdot \omega_{инстр}^2 \cdot \cos(\omega_{инстр} \cdot t). \end{cases}$$

На основании этих систем уравнений можно вычислить координаты, скорость (численной значение и направление) и ускорение (численной значение и направление) точки единичного абразивного зерна в любой момент времени [4].

Анализ расчетных траекторий показывает, что с увеличением частоты вращения заготовки, при одинаковой частоте вращения абразивной головки, увеличивается скорость шлифования. Но при этом происходит смещение густоты ячеек от центра вдоль оси X (см. рис. 4), что отрицательно сказывается на шероховатости и точности (сферичности) обработанной поверхности. Направление смещения зависит от направления вращения инструмента.

Можно выделить определенные зоны (рис. 5), которые хорошо различимы на обработанной поверхности при определенных режимах обработки. Зона 1 – это зона максимальных скоростей точки (при заданном направлении вращения абразивной головки $\omega_{инстр}$). Качество обработанной

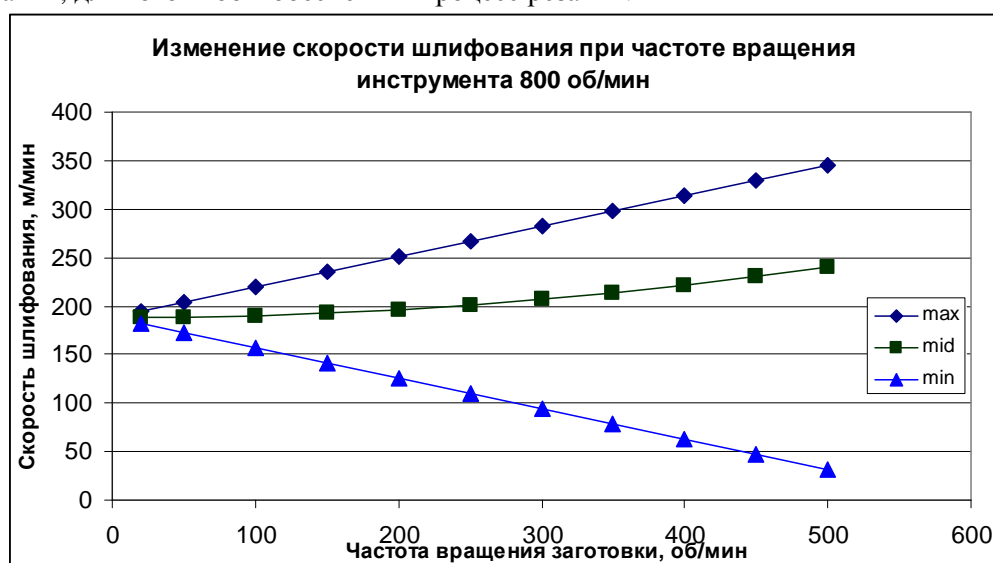


Р и с. 5. Области скоростей

поверхности в этой зоне высокое. Зона 3 – зона минимальных скоростей обработки. При некоторых режимах в этой зоне происходит шаржирование поверхности заготовки. Зона 2 – зона средних скоростей и среднего качества обработки. При смене направления вращения абразивной головки зоны 1 и 3 меняются местами.

Расчет максимальных и минимальных скоростей по формуле (2) позволяет найти закономерность изменения экстремумов скорости обработки в зависимости от частоты вращения заготовки и инструмента. На рис. 6. приведены значения максимумов и минимумов скоростей шлифования при различном сочетании частот вращения заготовки и инструмента. По оси X отложена частота вращения заготовки, по оси Y – скорости шлифования, в рамке – частоты вращения инструмента, знак max или min показывает на максимум или минимум скорости.

Анализируя рис. 6 можно определить диапазон скоростей шлифования и соответствующие этому диапазону соотношения частот вращения. Наибольший интерес представляет максимальная частота вращения инструмента, так как при этом скорость шлифования будет максимальна. Следует выбирать частоты вращения заготовки, при которых минимум скорости шлифования не выходит за пределы минимальной скорости шлифования, для того чтобы обеспечить процесс резания.



Р и с. 6. Скорости шлифования

При частоте вращения заготовки 500 об/мин и частоте вращения инструмента 800 об/мин на заготовке появляются участки, где скорость шлифования имеет значение около 30 м/мин, чего недостаточно для обеспечения качества поверхности заготовки. Оптимальное значение скорости обработки находится в области $n_{заг} < 500$ об/мин. Из вышесказанного можно сделать вывод, что анализ скоростных параметров процесса неполно характеризует процесс съема металла в процессе обработки [1].

Для расчета съема металла необходимо вычислить перекрытие траекторией зерна всей поверхности обработки, поскольку от этого перекрытия напрямую зависит отклонение геометрической формы сферического тела [3] и картина снятия припуска по поверхности.

При решении задачи был использован метод дискретизации. Сущность метода заключается в представлении непрерывного пространства в виде сплошного набора ограниченных участков пространства. Данный метод широко используется при решении различных задач. Применительно к шлифованию сферы последовательность шагов решения заключается в представлении поверхности обработки в виде набора конечных ячеек и расчета перемещений абразивных зерен относительно этих ячеек при различных режимах. Поверхность обработки была разбита примерно на 4 млн ячеек, т.е. средний размер ребра ячейки равен 0,1 мм. Для расчета параметров перемещения точки по системе уравнений (1) была разработана программа на языке Visual Basic.

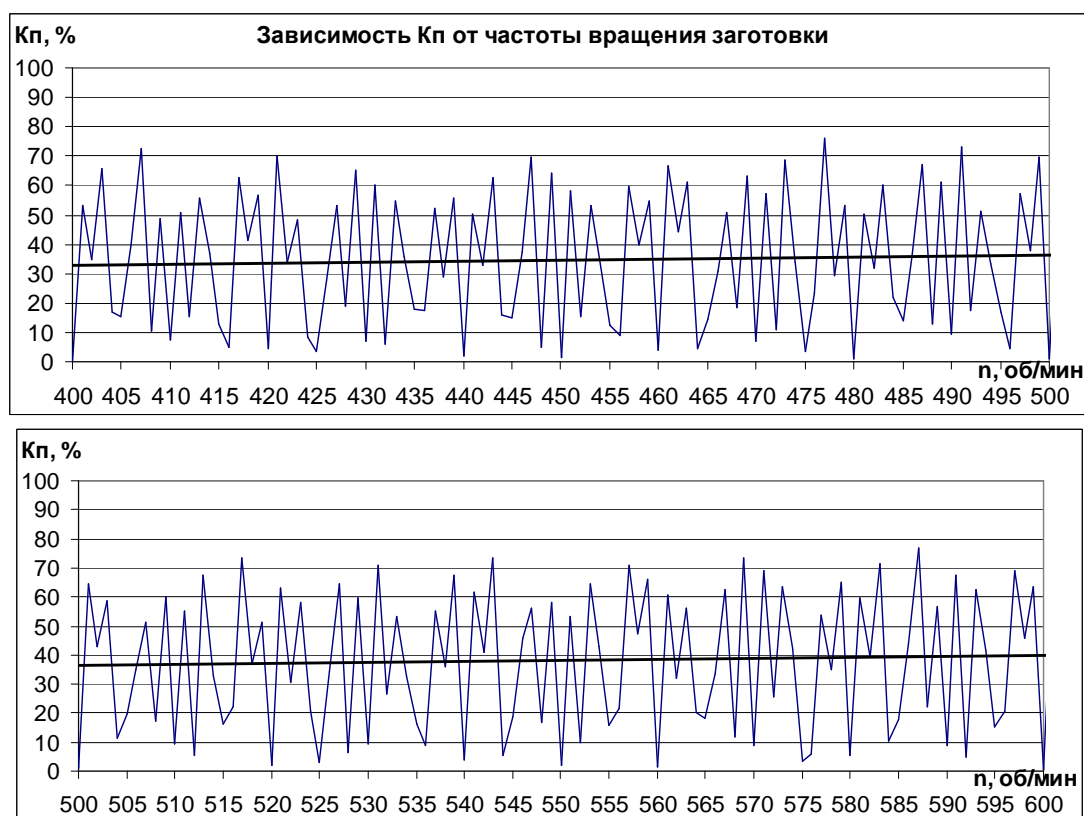
Произведен подсчет числа проходов абразивного зерна по каждой ячейке в процессе обработки. Результатом расчета является показатель охвата области обработки зерном – коэффициент перекрытия ячеек ($K_{п}$) – отношение количества ячеек, по которым прошло зерно, к общему числу ячеек. Кроме этого, определяются и другие параметры процесса.

Основной показатель распределения густоты ячеек, пройденным абразивным зерном, вычисляется для каждого сочетания частот вращения заготовки и абразивного инструмента. Наибольший интерес представляют сочетания частот вращения, при которых высокий коэффициент перекрытия сочетается с высокой скоростью обработки.

На рис. 6 представлена зависимость $K_{п}$ от частоты вращения заготовки. Расчет $K_{п}$ произведен при частоте вращения инструмента 800 об/мин и частотах вращения заготовки от 400 до 600 об/мин. Время обработки принималось равным 6 мин. Значения частот вращения заготовки отложены по оси X, значения $K_{п}$ – по оси Y. Из анализа графика можно точно определить частоты вращения инструмента, при которых $K_{п}$ достигает максимального значения. Также можно сделать вывод, что нет возможности найти строгий закон изменения значения $K_{п}$, однако можно найти некоторую закономерность его изменения:

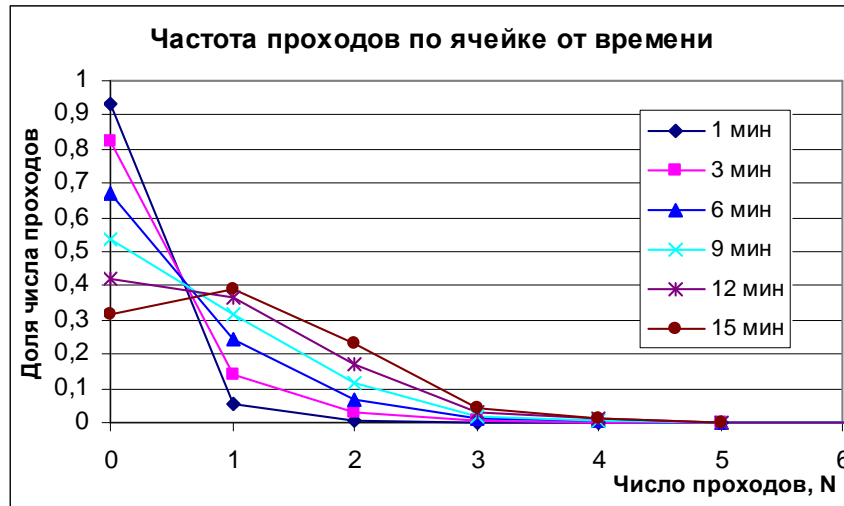
- значениям частот вращения заготовки, кратным частоте вращения инструмента (800 об/мин), соответствуют самые низкие значения $K_{п}$ (аналог стоячих фигур Лиссажу [3]);
- при четных значениях частот вращения заготовки $K_{п}$ в целом меньше, чем при нечетных;
- с увеличением частоты вращения заготовки среднее значение $K_{п}$ возрастает.

На основании этого коэффициента можно дать рекомендации по выбору оптимальных соотношений частот вращения заготовки и инструмента, при которых снятие припуска будет максимальным. Также можно вычислить средний объем снимаемого металла в каждом участке сферы и тем самым контролировать отклонения формы.



Р и с. 7. Значение $K_{п}$ при частоте вращения инструмента 800 об/мин и частоте вращения заготовки 400...600 об/мин. Жирной кривой показана средняя линия

Нахождение оптимальных режимов обработки сводится к вычислению целевой функции, основными параметрами которой являются: частоты вращения заготовки и абразивной головки, коэффициент перекрытия, скорость абразивного зерна на поверхности обработки, физико-механические свойства абразивного инструмента, подача при обработке, время обработки и т.п.



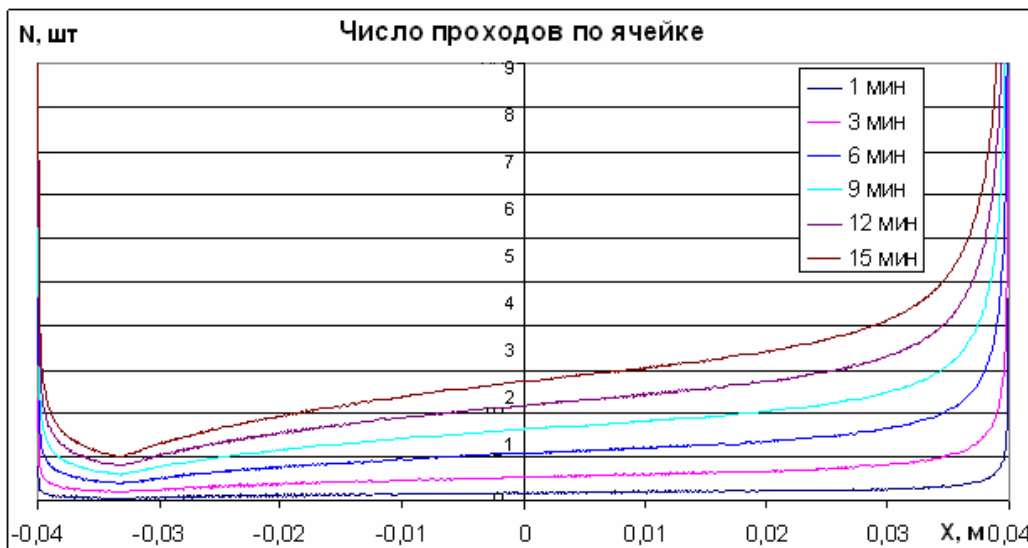
Р и с. 8. Распределение частоты проходов по ячейке от времени обработки.
 Параметры движения – $n_{инстр} = 800$ об/мин, $n_{заг} = 20$ об/мин

Существенное влияние на количество проходов единичного зерна по каждой ячейке имеет время шлифования. По результатам моделирования получена зависимость числа проходов одного зерна по каждой ячейке от времени. Расчет проведен для значения частоты вращения заготовки 461 об/мин. При этой частоте значение K_n лежит в средних пределах. На рис. 8 представлены значения числа проходов при разном времени обработки. По оси X отложено количество проходов по ячейке, по оси Y – доля числа проходов в общей сумме.

При расчете числа проходов зерна при тех частотах, где K_n имеет низкие значения, число проходов по ячейке возрастает значительно медленнее.

Как показывает анализ, среднее число проходов зерна по ячейке со временем возрастает практически линейно.

Согласно базовому технологическому процессу заготовка перед шлифованием обрабатывается на токарном станке с ЧПУ, при этом заготовке придается эллипсоидная форма. При шлифовании форма поверхности детали преобразуется в сфероидальную, но отклоняющуюся от сферической. Поскольку требования к сферичности детали высоки, то необходимо более точно выбрать форму исходной заготовки. В результате расчета получено распределение среднего числа проходов по ячейке вдоль оси вращения заготовки (рис. 9), что позволяет определить оптимальную форму поверхности заготовки. Исходя из этого анализа можно выбрать оптимальную форму заготовки и оптимальное время обработки в зависимости от снимаемого припуска.



Р и с. 9. Распределение среднего числа проходов по ячейке вдоль оси вращения заготовки

На ОАО СамараВолгоМаш проведены экспериментальные исследования процесса шлифования шаровой поверхности пробки шарового крана из нержавеющей стали 14X17H2. Шлифование производилось на сферошлифовальном станке модели МК-6743. Шлифовальная головка состоит из 4 абразивных брусков. Известно, что обрабатываемость сталей подобного класса крайне низка, поэтому очень важен правильный

подбор характеристик абразивных брусков и режимов шлифования: скорости вращения заготовки, поперечной подачи.

При неизменной производительности процесс обработки (снятия припуска) можно рассматривать с двух позиций. Первая позиция основана на силовом воздействии рабочей поверхности шлифовального бруска и заготовки, что приводит к его наиболее интенсивному износу, при этом шероховатость поверхности самая низкая. Вторая позиция основана на изменении кинематики процесса и повышении скорости вращения заготовки. В этом случае поперечная подача должна уменьшаться в 8-10 раз, а длина пути, пройденного абразивным зерном, повышается в 12-16 раз, что приводит к уменьшению шероховатости абразивной поверхности. Наиболее перспективным, на наш взгляд, является второй подход.

Однако такой подход требует более качественного оборудования и настройки технологической операции, а также правильного выбора характеристик абразивного бруска. Так как в процессе обработки абразивное зерно проходит большой путь, то, соответственно, перед рабочим зерном шлифовального бруска образуется значительное количество снятого металла, который необходимо размещать в порах рабочей поверхности. Поэтому были применены шлифовальные бруски с открытыми структурами 10-15.

По базовому технологическому процессу применяются абразивные бруски на керамических связках. При этом в процессе обработки происходит интенсивное засаливание рабочей поверхности абразивных брусков. Связано это с тем, что в процессе самозатачивания изношенные зерна и частицы металла, окружающие это зерно, не успевают удалиться из зоны обработки. С явлением засаливания можно бороться несколькими способами: применением менее прочных связок абразивных брусков (вулканитовых, бакелитовых); более открытых структур абразивных брусков, которые повышают размер пор; использованием абразивных брусков с повышенной пористостью (пористость 45-54 %). Применение брусков открытых структур позволяет избежать засаливания рабочей поверхности. Использование вулканитовой связки и уменьшение зернистости способствуют более интенсивному самозатачиванию рабочей поверхности инструмента.

Разработана технология шлифования пробок из коррозионно-стойких сталей. Спроектирована и изготовлена партия абразивных брусков на керамических связках из карбида кремния зеленого. Часть брусков была пропитана серой в вакууме по специальной технологии. Испытывались бруски БК 20×20×150 следующих характеристик: 24А М28П СМ1 11 К5; 63С М28П СМ2 10 КБ; 63С М28П СМ2 10 КБ (пропитанные серой S). Режимы обработки варьировались: $n_{\text{заг}} = 20 \dots 800$ об/мин, $S_{\text{поп. цикл}} = 0,02 \dots 0,6$ мм/цикл, $S_{\text{поп.}} = 0,002 \dots 0,1$ мм/об, $S_m = 1,5 \dots 2$ мм/мин. Проведены эксперименты по обработке этими брусками.

На основании исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана кинематическая модель процесса шлифования абразивными брусками. Выведены уравнения траектории движения абразивного зерна по сферической поверхности. Исследована кинематика взаимодействия абразивного зерна с поверхностью заготовки. Расчеты методом дискретизации позволили выявить области поверхности с наименьшими и наибольшими скоростями обработки.

2. Определены области формирования максимальной и минимальной шероховатости поверхности. Даны рекомендации по изменению структуры переходов, обеспечивающих равномерную шероховатость сферической поверхности.

3. Предложена математическая модель формирования макро- и микроотклонений сферической поверхности на основе расчета коэффициента перекрытия следов абразивного зерна. Анализ показал, что в зависимости от режимов обработки можно получить поверхность с максимальным коэффициентом перекрытия на каждом участке поверхности. Составлена программа расчета оптимальных режимов обработки.

4. По результатам экспериментов наилучшие результаты по шероховатости поверхности показали бруски из 63С, пропитанные серой.

5. Обработка керамическими брусками из 24А невозможна, так как происходит засаливание рабочей поверхности брусков на первых циклах обработки.

6. Разработана методика расчета оптимальных режимов обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 172 с.
2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
3. Носов Н.В., Кравченко Б.А. Технологические основы проектирования абразивных инструментов. М.: Машиностроение-1, 2003. 257 с.
4. Николаев Ю.А. Кинематика процесса виброконтантного полирования // Молодые ученые и специалисты Куйбышевской области – 60-летию ВЛКСМ: Тез. докл. науч.-техн. конф. Куйбышев, 1978. С. 60-62.
5. Некрасов В.П. О некоторых свойствах кривых Лиссажу в связи с исследованием процесса плоской доводки // Абразивно-алмазная обработка: Сб. науч. тр. ППИ №54. Пермь, 1969. С.18-24.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 496 с.

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2006 г.

Е.А. Солдусова, Я.М. Клебанов, М.И. Ботов

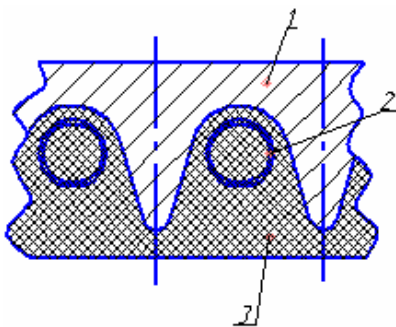
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ СПИРАЛЬЮ И ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИЕЙ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ КОНФОРОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛИТ

Исследуется распределение температурного поля в конфорках электрических плит, используемых на предприятиях общественного питания. Особое внимание уделяется влиянию воздушных зазоров между нагревательной спиралью и электроизоляционной массой и других зазоров. Используемый подход опирается на применение метода конечного элемента. Подробно рассматриваются вопросы моделирования процессов теплопроводности в конфорке с учетом зазоров и других особенностей её конструкции. Приводятся результаты численной реализации.

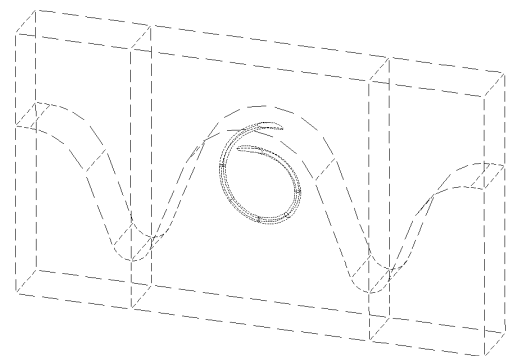
При решении многих технических задач, связанных с анализом тепловых процессов, приходится учитывать влияние на распределение температурных полей различного вида воздушных и других газовых зазоров. Зазоры между элементами конструкций, оказывающие значительное влияние на тепловые потоки, могут быть следствием соответствующего конструктивного решения, возникать из-за микронеровностей контактных поверхностей, образовываться в результате термических деформаций в процессе эксплуатации.

Вопрос учёта влияния возникающих зазоров на долговечность и эксплуатационные свойства конструкции является, в частности, весьма актуальным при проектировании конфорок электрических плит, используемых на предприятиях общественного питания. Схематически поперечное сечение наиболее распространённой конструкции резистивной конфорки с чугунным прямоугольным или круглым корпусом показано на рис. 1.

В приведенной на рисунке конструкции существенные по величине зазоры между нагревательной проволокой (спиралью) и электроизоляцией образуются в процессе эксплуатации в результате повторно-переменных термических деформаций корпуса, электроизоляционного слоя и проволоки, имеющих различные значения коэффициентов термического расширения. В других конструкциях конфорок, когда, например, в качестве изоляции используются фарфоровые кольца, величина зазоров регламентируется конструкторской документацией. Наличие таких зазоров приводит к увеличению температуры спирали и снижению её долговечности [1,2]. Другой воздушный зазор имеет место между поверхностью конфорки и дном наплитной посуды. Он образуется вследствие постепенного накопления остаточной деформации дна посуды и нарушения его плоскостности. Неравномерность этого зазора сказывается на качестве приготовления пищи [1].



Р и с. 1. Поперечное сечение конфорки с закрытым электронагревательным элементом:
1 – корпус, 2 – спираль, 3 – изоляционная масса



Р и с. 2. Трехмерная модель ячейки электрической плиты. Обозначения те же, что на рис. 1

В данной работе рассматривается методика моделирования процессов теплопроводности в конфорке электрических плит с учетом указанных зазоров методом конечного элемента и проводится анализ влияния величин зазоров на распределение температур для случая стационарной теплопроводности.

Уравнение стационарной теплопроводности для твердого тела, занимающего область Ω , в прямоугольной декартовой системе координат $x_i = (x, y, z)$ имеет вид

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + W = 0, \quad (1)$$

где W – удельная объемная мощность теплоисточников; λ – коэффициент теплопроводности; T – поле температур в области Ω .

При моделировании используются следующие типы граничных условий. Граничные условия на части поверхности S_1 , где задана температура:

$$T|_{S_1} = T_{s_1}. \quad (2)$$

Граничные условия на части поверхности S_2 с конвективным теплообменом:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} = \alpha (T - T_b), \quad (3)$$

где T – поле температур в области Ω , занимаемой телом; T_b – температура внешней среды; α – конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи; n – внешняя нормаль к поверхности.

Граничные условия на части поверхности S_3 , где тепловой поток можно разделить на две части: поток q_1 , вызванный непосредственной передачей теплоты газовой среде, и поток q_2 , обусловленный радиационным теплообменом с поверхностью твёрдого тела S_4 , принимают вид

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_3} = q_1 + q_2, \quad (4)$$

$$q_2 = c_0 \varepsilon F \left(\left(\frac{T_{S_3}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{S_4}}{100} \right)^4 \right), \quad (5)$$

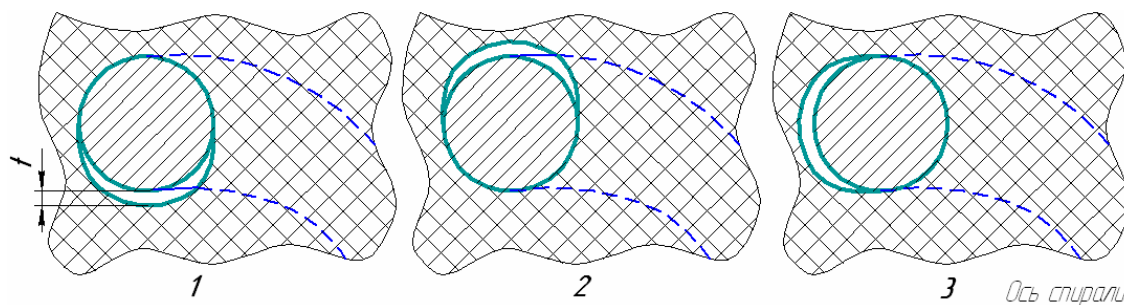
где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($c_0 = 5,67 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$); ε – приведённая степень черноты излучающей поверхности; F – геометрический фактор. В (1) – (5) большинство величин являются функциями пространственных координат.

Элементы конфорки имеют достаточно сложную геометрическую форму, они изготовлены из нескольких материалов, их теплофизические параметры существенно зависят от температуры. Известные аналитические решения задач теплопроводности конфорок [1] получены на основе линеаризации уравнений краевой задачи и других достаточно сильных допущений. Например, поля температур поверхности конфорки и дна наплитной посуды считаются однородными. Построенные на основе этих решений методики проектирования вынужденно используют большой объём экспериментальных данных, являясь, таким образом, полуэмпирическими. Все вышеизложенное свидетельствует об актуальности развития современных численных подходов моделирования, позволяющих корректно решать нелинейные и неоднородные краевые задачи теплопроводности, описываемые зависимостями (1) – (5), в том числе и для электрических резистивных чугунных конфорок.

Передача теплоты в зазоре между спиралью и электроизоляционной массой осуществляется за счет теплопроводности воздуха и излучения. Для анализа влияния этого зазора в САЕ ANSYS была создана объемная конечно-элементная модель ячейки плиты, показанная на рис. 2. Толщина ячейки равна одному шагу спирали, высота – толщине конфорки, ширина – двум межреберным расстояниям корпуса конфорки. Спираль, корпус конфорки и электроизоляционная масса моделировались объёмными десятиузловыми элементами Solid 87. Тепловые процессы в зазорах, которые описываются зависимостями (4) – (5), моделировались элементами типа Link. Это двухузловые стержневые элементы. Они соединяют расположенные напротив друг друга узлы на поверхностях проволоки и электроизоляционной массы. Теплопроводность воздушной среды в зазоре представлена с помощью конечного элемента Link 34. Излучение учитывалось введением конечных элементов Link 31 [3].

Расположение зазоров относительно спирали носит произвольный характер и неоднородно по длине проволоки. В связи с этим представляет интерес анализ влияния расположения и величины зазоров на температуру спирали. Рассмотрены следующие варианты расположения зазора: с внешней стороны проволоки, с внутренней стороны проволоки и переменное расположение зазора по длине витка. Эти варианты иллюстрируются на рис. 3. В поперечном сечении зазор имеет серповидную форму. В дальнейшем будем характеризовать его наибольшим расстоянием между проволокой и изоляцией в центре этого сечения (величина t на рис. 3).

Заметим, что зазоры величиной в несколько микрон возникают вследствие микронеровностей на поверхности проволоки, а также из-за особенностей структуры электроизоляционной массы. Поэтому даже в местах, которые на рис. 3 показаны как непосредственный контакт проволоки и изоляции, на самом деле имеется соответствующий зазор. Вместе с тем проведённые расчёты показали, что зазор до 5 мкм практически не влияет на разность температур контактирующих поверхностей и может не учитываться при моде-



Р и с. 3. Варианты расположения зазора между проволокой и изоляцией:
 1 – зазор с внутренней стороны спиральной проволоки, 2 – зазор с внешней стороны спиральной проволоки,
 3 – зазор с боковой стороны спиральной проволоки; t – величина зазора

лировании [4].

Основными материалами для изготовления корпусов конфорок являются черные сплавы – чугуны и стали, для изоляционной массы используются периклаз, шамотная глина, кварцевый песок, слюда, кварцевое стекло, фарфор и керамика. Нагревательная спираль может изготавливаться из сплавов никеля с жаропрочными присадками: хромоникелевые (нихромы), железохромоникелевые (фехрали, хромали). В данной работе в качестве материала корпуса конфорки выбран серый чугун марки СЧ 21-40, изоляционный материал – периклаз. Для нагревательной спирали принят нихром Х20Н80. Теплофизические свойства этих материалов представлены в таблице.

Приведённый коэффициент теплоотдачи жарочной поверхности конфорки без наплитной посуды α складывается из коэффициентов конвекции α_k и приведённого коэффициента излучения α_l :

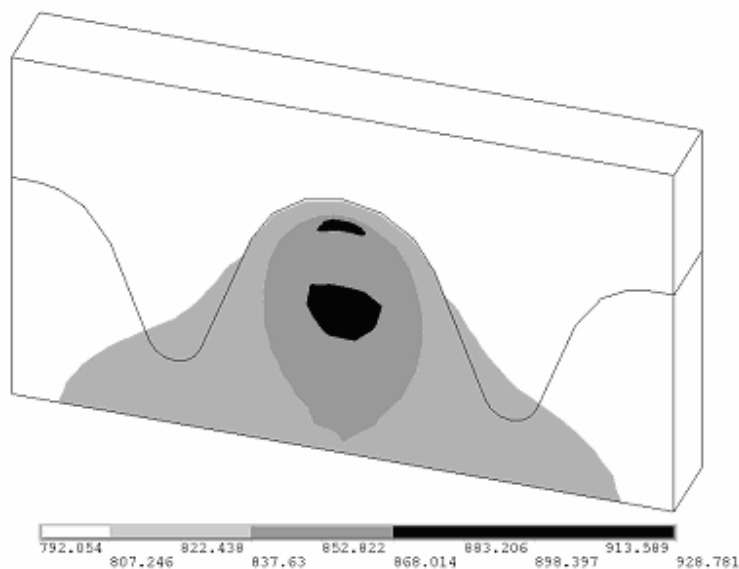
$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l. \quad (6)$$

Свойства материалов конфорки

Материал	Плотность, кг/м ³	Температура, К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м К
Серый чугун	7570	293	29,2
		373	32,4
		473	35,8
		573	37,2
		673	36,6
		873	20,8
Периклаз	1000	273 – 873	1,86
Нихром	8310	293	12,7
		373	13,8
		473	15,6
		573	17,1
		873	21,8

В общем случае α зависит от температуры жарочной поверхности. Для выполненных ниже расчётов принималось среднее значение $\alpha = 42 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

На рис. 4 в качестве примера представлено распределение поля температур для одного из рассмотренных расчётных случаев: расположение воздушного зазора с внешней стороны. Графические зависимости максимальной температуры в витке спирали от величины зазора при разном его расположении приводятся на рис. 5. Нулевой зазор соответствует условиям идеального контакта.

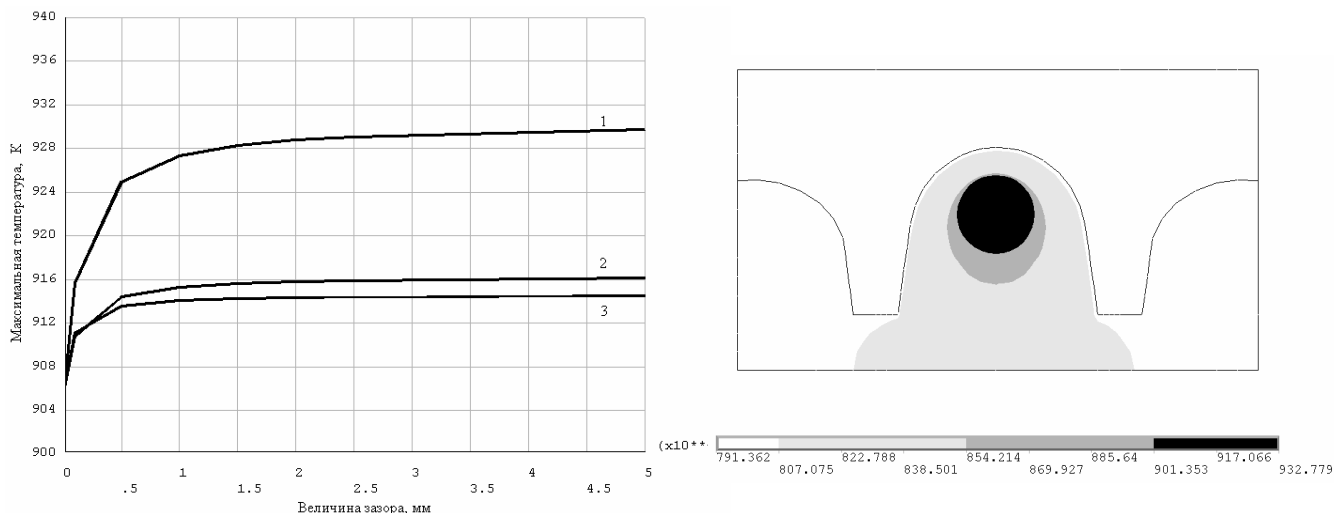


Р и с. 4. Поле температур при расположении зазора с внешней стороны, величина зазора равна 0,2 мм

возрастает на величину до 16 градусов. Таким образом, наличие зазоров между спиралью и изоляционной массой может заметно сказаться на долговечности спирали. Для каждой марки проволоки имеется рекомендуемая рабочая температура, превышение которой приводит к увеличению скорости термической коррозии [5]. Если конструкция конфорки и её технические характеристики на стадии проектирования определены без учета зазоров, то образование зазоров в процессе эксплуатации приведет к повышению температуры выше допустимого уровня и увеличит опасность перегорания резистивного элемента.

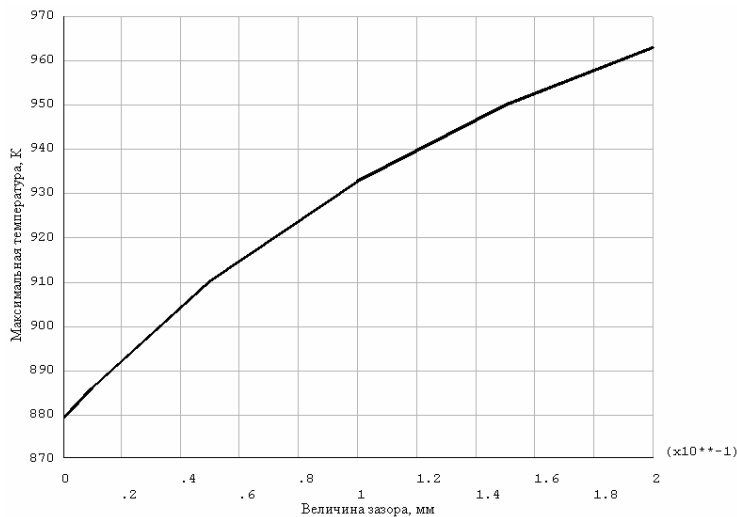
При моделировании конфорки в целом детальное представление спирали с конечно-элементным описанием каждого витка представляется невозможным. В связи с этим спираль моделируется в виде полого цилиндра. В работе [6] такая замена в зависимости от шага спирали обоснована для случая, когда зазор между спиралью и электроизоляцией отсутствует. Рассмотрим теперь случай, когда имеется воздушный зазор. Чтобы необоснованно не усложнять объёмную модель, целесообразно ограничиться введением кольцевого зазора. Расположение этого зазора с внутренней стороны цилиндра интереса не представляет, так как внутри цилиндра практически отсутствуют тепловые потоки, и поле температур является равномерным. Зазоры, задаваемые вокруг цилиндра, оказывают заметное влияние на распределение температуры в цилиндре. Результаты решения плоской задачи с внешним кольцевым зазором показаны на рис. 6 и 7. Спираль, корпус конфорки и электроизоляционная масса моделировались плоскими четырёхузловыми конечными элементами Plane 55, зазоры – элементами Link 34 и Link 31 [3].

Графические зависимости максимальной температуры в витке спирали от величины зазора при разном его расположении приводятся на рис. 5. Нулевой зазор соответствует условиям идеального контакта. Результаты расчётов показывают, что температура рабочей поверхности конфорки весьма мало зависит от наличия и величины зазоров между спиралью и электроизоляцией. Вместе с тем даже небольшой зазор приводит к заметному повышению температуры спирали. Кольцевой зазор 0,01 мм на 8-12 градусов поднимает максимальную температуру витка по сравнению с идеальным контактом, в последнем случае эта температура составляет 903 градуса. Но начиная примерно с величины 0,05 мм дальнейшее увеличение зазора не оказывает влияния на изменение максимальной температуры. Худшим с точки зрения долговечности спирали является образование зазора с внешней её стороны. При этом максимальная температура в витке спирали дополнительно



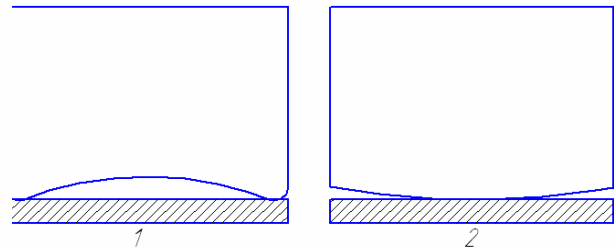
Р и с. 5. Зависимость максимальной температуры витка

спирали от величины и расположения зазора:
 1 – зазор с внешней стороны; 2 – зазор с внутренней стороны;
 3 – зазор с переменным расположением вдоль витка спирали



Р и с. 7. Зависимость максимальной температуры спирали от величины внешнего кольцевого зазора в плоской модели

Р и с. 6. Распределение поля температур в плоской модели с внешним кольцевым зазором 0,1 мм



Р и с. 8. Различное прилегание дна посуды к жарочной поверхности конфорки:
 1 – вогнутое дно, 2 – выпуклое дно

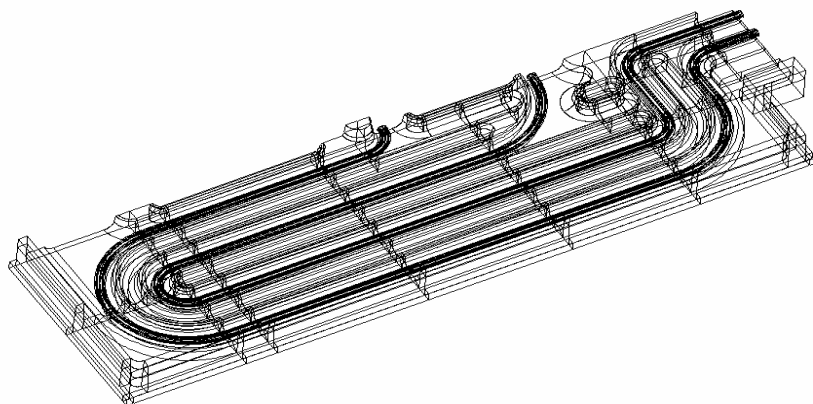
Сопоставление рис. 5 и 7 позволяет заключить, что плоская модель дает лишь приближенное значение температуры проволоки при наличии зазора. Вместе с тем внешний кольцевой зазор в плоской модели размером 0,05-0,1 мм всё же позволяет достаточно точно отразить температуру спирали. С учетом того обстоятельства, что наличие зазора и его величина мало влияют на температуру изоляции и корпуса конфорки, для определения подробного распределения температур по витку спирали предлагается применение метода подконструкций. Сущность этого метода заключается в том, что сначала выполняется решение глобальной задачи, в которой расчёт конфорки производится с представлением спирали в виде полого цилиндра и с заданием внешнего кольцевого зазора 0,05-0,1 мм. По результатам этого решения определяется локализация наиболее нагретого участка спирали. В этом месте “навешивается” подмодель – объёмная конечно-элементная модель ячейки, показанная на рис. 2. По её периферийным поверхностям значения температуры задаются в соответствии с граничным условием (2), где T_{s_1} – поле температур, полученное в соответствующих узлах при решении глобальной задачи, а по торцевым поверхностям – условия циклической симметрии и изоляции. Последнее основывается на пренебрежимой малости различия полей температур в поперечных к оси спирали сечениях, отстоящих друг от друга на расстояние в один шаг.

Решение локальной задачи – задачи стационарной теплопроводности в подмодели – позволяет более точно определить температурное поле в витке спирали и установить максимальное её значение. Процедура метода подконструкций в САЕ ANSYS, как и в других аналогичных профессиональных программных пакетах МКЭ, хорошо автоматизирована.

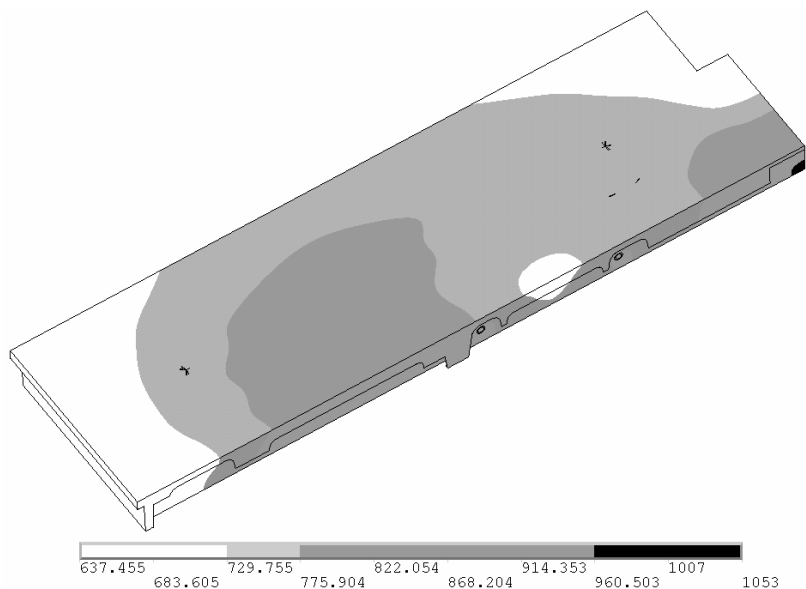
Рассмотрим теперь влияние зазора, образующегося между поверхностью конфорки и дном наплитной посуды. Геометрия этого зазора зависит от формы, которую принимает дно посуды вследствие накопления остаточных деформаций. Две основные формы показаны на рис. 8 [1]. При использовании наплитной посуды с деформированным дном первой формы непосредственный контакт поверхностей осуществляется по полосе, размеры которой определяются размерами и формой дна посуды. Во внутренней части образуется замкнутый воздушный зазор. Теплоотдача в этом случае осуществляется теплопроводностью между контактирующими частями дна посуды и конфорки, а в зазоре – теплопроводностью слоя воздуха и излучением между жарочной поверхностью конфорки и дном посуды. Теплопроводность воздуха в зазоре может моделироваться с помощью конечного элемента типа Link 34, а процесс передачи тепла излучением между дном наплитной посуды и поверхностью конфорки – посредством элемента типа Link 31. При использовании посуды с деформированным дном второй формы зазор является открытым, и в этом случае передача тепла происходит в результате конвекции и излучения [1], что может быть учтено с помощью приведённого коэффициента конвективного теплообмена (6).

Изложенный выше подход был реализован при анализе стационарной теплопроводности конфорки промышленной электрической плиты марки ПЭ-0,51 СП, представленной на рис. 9. Условия симметрии позволяют ограничиться рассмотрением половины всей конфорки. Выбраны материалы с теми же свойст-

вами, что и для рассмотренных выше задач. Расчеты выполнялись при условном кольцевом воздушном зазоре вокруг электронагревателя величиной 0,1 мм. Полученное распределение температур на холостом ходу конфорки (без налитной посуды) показано на рис. 10. Как видим, минимальное значение температуры имеет место на краю конфорки. Разность температур по жарочной поверхности находится в пределах 200 градусов.



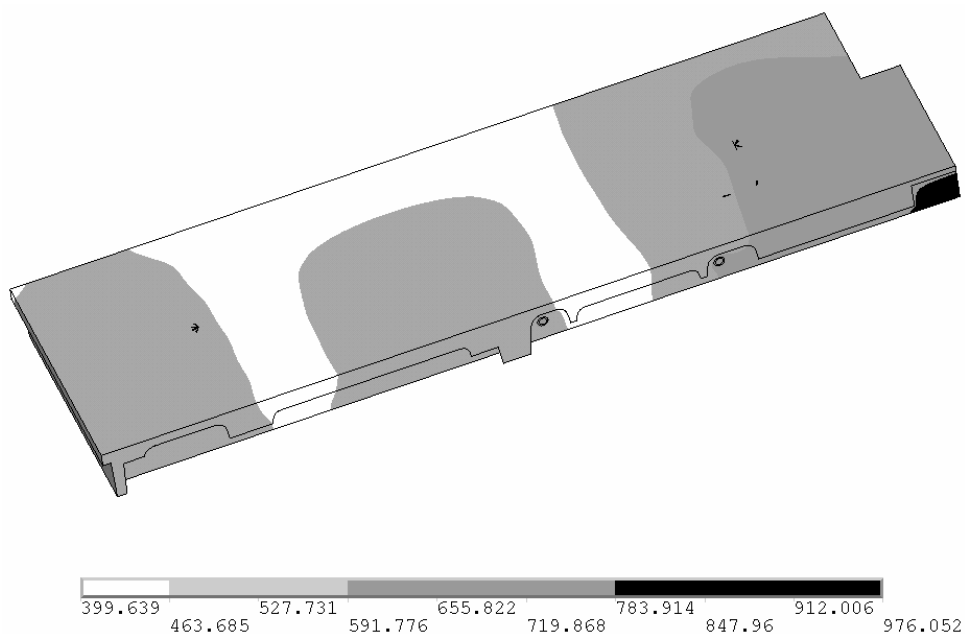
Р и с. 9. Составленная в ANSYS модель половины конфорки. Показаны созданные объёмы корпуса и спиралей конфорки; электроизоляция не показана



Р и с. 10. Распределение температур в конфорке электрической плиты ПЭ-0,51 СП

В задаче с наплитной посудой первой формы задавался коэффициент конвективного теплообмена между дном посуды и кипящей водой в соответствии с кривой кипения (кривой Нукияма) [7, 8]. Материал посуды – алюминиевый сплав. Полученное в этом случае поле температур показано на рис. 11.

Результаты выполненных расчётов показывают, что неоднородность поля температур на жарочной поверхности имеет место даже в присутствии посуды с кипящей водой, температура которой во всём объёме одинакова. Это подчёркивает важность использования разрабатываемой авторами данной статьи методики имитационного моделирования процессов теплопроводности в конфорке для совершенствования её конструкции с целью обеспечения более равномерного нагрева жарочной поверхности и нагревательной спирали и, на этой основе, – улучшения качества приготовления пищи, обеспечения более высокой долговечности нагревательной спирали и конфорки в целом.



Р и с. 11. Поле температур конфорки при загруженном состоянии

Кроме того, сопоставляя результаты на рис. 10 и 11, можно заключить, что температура нагревательного элемента на холостом ходу конфорки выше примерно на 77 градусов. Полученное максимальное значение температуры спирали соответствует нижней границе рекомендуемого диапазона рабочих температур для рассматриваемой марки сплава [5].

Применение метода конечного элемента для расчета теплового состояния электрических конфорок позволяет весьма точно рассчитывать температуру во всех её элементах, включая определение важных для

проектирования максимальных значений температуры в резистивном элементе (электрической спирали) и распределение температуры по поверхности конфорки.

Наличие температурных зазоров между резистивным элементом и диэлектрическим слоем в пределах от 0,01мм до 0,1 мм способно вызвать локальный перегрев этого элемента до 16 градусов, что может отразиться на заметном снижении ресурса работы нагревательного элемента.

Использование метода конечного элемента позволяет оптимизировать размеры резистивного элемента и геометрию его расположения в корпусе с целью создания более равномерного температурного поля на поверхности конфорки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вышелесский А.Н.* Тепловое оборудование предприятий общественного питания. М.: Экономика, 1976. 399 с.
2. *Hegbot T.* Integrating electrical heating elements in appliance design. New York: Marcel Dekker, 1997. 462 p.
3. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide. ANSYS Release 5.6. ANSYS Inc., 1998.
4. *Попов В.М.* Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 216 с.
5. *Липатов Н.Н., Ботов М.И., Муратов Ю.Р.* Тепловое оборудование предприятий общественного питания. М.: Колос, 1994. 431 с.
6. *Ботов М.И., Клебанов Я.М., Солдусова Е.А.* Применение расчетного метода конечных элементов к анализу теплового состояния конфорок электроплит // Тр. Инженерно-экономического факультета РЭА им. Г.В. Плеханова. Вып. 5. / Под общ. ред. В.А. Колоколова; М.: Изд-во Россельхозакадемии, 2006. С. 707-717.
7. *Неугодов В.Е.* Курсовое проектирование электротепловых аппаратов: Метод. указ. М.: Ред.-изд. отд. Моск. ордена Трудового Красного Знамени ин-та нар. хоз. им. Г.В. Плеханова, 1965. 168 с.
8. *Грошев А.И., Сайкин А.М., Худаско В.В.* Экспериментальное исследование теплообмена при кипении в большом объеме с периодическим энерговыделением // Кипение и конденсация. 1989. С.53-57.

Поступила в редакцию 28 ноября 2006 г.