

где  $\sigma_0 = \beta E T_x / (1 - \nu)$  – максимально возможные термические напряжения, Па;  $\beta$  – линейный коэффициент термического расширения,  $1/K$ ;  $E$  – модуль упругости, Па;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

#### Выводы.

1. На основе анализа конвективного нагрева (охлаждения) тел правильной геометрической формы в квазистационарной стадии выведено интегральное уравнение, с помощью которого можно приближенно решать задачи теплопроводности с нелинейностью в граничных условиях.

2. Разработана инженерная методика расчета температурных полей при переменных коэффициентах теплообмена и температуре среды.

3. Сравнение методики с точным численным решением показало, что погрешность определения температур не превышает 6% и ее можно считать вполне приемлемой для инженерных расчетов.

4. Приведены формулы для расчета осевых термических напряжений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Коздоба Л.А. – М.: Наука, 1975. – 228с.
2. Саломатов В.В. К расчету радиационного охлаждения твердых тел / Саломатов В.В. // ИФЖ. – 1969. – Т.17. – №1. – С.127-134.
3. Саломатов В.В. Температурное поле неограниченной пластины при переменных значениях коэффициента теплообмена и температуры внешней среды / Саломатов В.В., Гончаров Э.И. // ИФЖ. – 1967. – Т. 14. – №4. – С.743-745.
4. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов / Гольдфарб Э.М. – М.: Металлургия, 1967. – 439с.
5. Горбунов А.Д. Аналитический расчет температур и термических напряжений при граничных условиях II рода / Горбунов А.Д., Уклеина С.В. // Днепрпетровск: НМетАУ. – 2015. – Вып. 6 (21). – С.12-17.

*Поступила в редколлегию 23.02.2016.*

УДК 621.1.018

БЕЛОНОЖКО В.Ю., студент  
ЧУХНО С.И., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

## УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Введение.** Эксплуатационные свойства деталей машин во многом формируются на этапе окончательной обработки, в качестве которой часто используется шлифование. При этом развиваются высокие температуры, определяющие свойства поверхностного слоя деталей. Одним из наиболее эффективных методов охлаждения при шлифовании является применение смазывающе-охлаждающих жидкостей. Оно может осуществляться свободно падающей или напорной струей, воздушно-жидкостной смесью, через поры круга, в среде охлаждающей жидкости и некоторыми другими способами [1]. Чаще всего применяется охлаждение свободно падающей струей, так как этот способ достаточно эффективен и наиболее прост в реализации.

Математические модели тепловых процессов в деталях при их обработке резанием содержат дифференциальное уравнение теплопроводности, начальное и граничные условия. Качество формулирования комбинаций граничных условий, соответст-

вующих существенным условиям протекания реального процесса, определяет степени приближения расчетных и действительных температурных полей.

Граничные условия на свободных поверхностях детали при шлифовании с применением смазывающе-охлаждающей жидкости формулируют как граничные условия третьего рода, соответствующие конвективному теплообмену поверхности детали с окружающей средой. При этом коэффициент теплоотдачи определяется на основании критериальных уравнений, полученных в условиях обтекания тел различной формы. Например, применительно к случаю плоского шлифования используются уравнения, полученные в результате экспериментальных исследований продольного обтекания плоскости, а применительно к круглому шлифованию – в результате исследований поперечного обтекания цилиндра. При этом для расчета критерия Рейнольдса в качестве характерного размера используется соответствующий размер детали, а скорость среды принимается равной скорости истечения смазывающе-охлаждающей жидкости на срезе подающего сопла станка.

Граничные условия в пределах зоны резания формулируют как граничные условия второго рода. При использовании схемы сплошного контакта детали и шлифовального круга плотность теплового потока принимается усредненной по площади зоны резания. При использовании схемы дискретного контакта зерен шлифовального круга и детали чередуются граничные условия второго рода с плотностью теплового потока от единичного зерна и нулевой плотностью теплового потока в межзерновом пространстве. И в том и в другом случае считается, что смазывающе-охлаждающая жидкость не попадает в зону резания. Последнее, однако, не является общепризнанным, поскольку не имеет экспериментального подтверждения.

**Постановка задачи.** В данной статье рассматривается задача установления граничных условий на различных участках поверхности детали при круглом наружном шлифовании с целью формулирования математической модели теплового процесса, учитывающей особенности течения смазывающе-охлаждающей жидкости.

**Результаты работы.** На поверхности детали при шлифовании имеют место смешанные граничные условия. При этом следует выделить три участка поверхности с разными условиями теплообмена. Первый участок находится непосредственно в зоне резания, где смазывающе-охлаждающая жидкость находится в зазоре между связкой круга и обрабатываемой поверхностью. В соответствии с [2] средняя толщина этого зазора равна:

$$h_o = (0,10...0,15)d_3,$$

где  $d_3$  – размер абразивных зерен.

Величина  $h_o$  составляет, таким образом, от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. Таким образом, на этом участке имеет место течение жидкости в капиллярной щели. Известно [3], что течение жидкостей в капиллярных щелях подчиняется до определенного размера щели общим законам гидравлики; критическое число Рейнольдса, при превышении которого нарушается ламинарность потока, обычно соответствует:

$$Re = V \cdot h_o / \nu = 1000...1200,$$

где  $h_o$  – толщина щели (характерный размер), равная, в данном случае, величине зазора между связкой круга и обрабатываемой поверхностью;  $V$  – скорость жидкости в капиллярной щели,  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

Для случая течения жидкости между двумя поверхностями, одна из которых неподвижна (деталь), а вторая перемещается относительно первой со скоростью  $V_{кр}$  (шлифовальный круг), расход жидкости через капиллярную щель согласно [3] составляет:

$$Q = \left( \frac{p_1 - p_2}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot h_o^3 + V_{кр} \cdot \frac{h_o}{2} \right) \cdot W,$$

где  $W$  – ширина щели (в данном случае равная ширине шлифовального круга);  $p_1$  и  $p_2$  – давления на входе и выходе из капиллярной щели (в данном случае зоны резания);  $\mu$  – динамическая вязкость смазывающе-охлаждающей жидкости;  $L$  – длина щели (в данном случае равная длине контакта детали и шлифовального круга)

$$L = \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t_p},$$

где  $R_{кр}$  – радиус шлифовального круга;  $t_p$  – глубина резания.

Тогда средняя скорость жидкости под шлифовальным кругом:

$$V_{cp} = \frac{Q}{W \cdot h_o} = \frac{p_1 - p_2}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot h_o^2 + \frac{V_{кр}}{2}.$$

Согласно [4] перепад давления ( $p_1 - p_2$ ) составляет величину порядка  $10^4 \dots 10^6$  Па, а длина щели под кругом  $L$  составляет несколько миллиметров. При таких условиях величина первого слагаемого  $(p_1 - p_2) \cdot h_o^2 / 12 \cdot \mu \cdot L$  на порядок меньше второго  $V_{кр} / 2$  и можно считать, что средняя скорость смазывающе-охлаждающей жидкости под кругом незначительно превышает  $V_{кр} / 2$ . Тогда Число Рейнольдса для шлифовальных кругов распространенной зернистости (от 6 до 40) при скорости резания 50 м/с равно  $Re = 100 \dots 500$ .

Таким образом, в зоне резания под шлифовальным кругом имеет место ламинарное течение в капиллярных каналах. При свойственном шлифованию высоких температурах резания здесь можно ожидать кипение смазывающе-охлаждающей жидкости.

Таким образом, граничные условия для детали в зоне резания можно записать в следующем виде:

- под режущим зерном, где происходит нагрев под действием теплового потока с плотностью  $q$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = q;$$

- в межзерновом пространстве

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{к} (t_s - t_{к}),$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала детали,  $\partial t / \partial \tau$  – температурный градиент,  $\alpha_{к}$  – коэффициент теплоотдачи при кипении,  $t_s$  и  $t_{к}$  – температура поверхности детали и температура кипения смазывающе-охлаждающей жидкости.

Второй участок – это течение жидкости в зоне, непосредственно прилегающей к задней границе зоны резания, величину которого  $L_{зо}$  можно оценить от нескольких до 10 мм. На этом участке течение жидкости определяется гидродинамическими явлениями в клиновом зазоре между шлифовальным кругом и поверхностью детали.

Расход жидкости в клиновом зазоре между поверхностью детали и шлифовальным кругом можно определить аналогично расходу в гидродинамическом подшипнике [5]:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot W \cdot R \cdot \frac{\int \frac{d\varphi}{h^2}}{\int \frac{d\varphi}{h^3}}$$

где  $W$  и  $R$  – в данном случае частота вращения и радиус шлифовального круга;  
 $h$  – форма щели  $h(\varphi)$ . Форма щели при плоском шлифовании:

$$h(\varphi) = R_{кр} \cdot (1 - \cos \varphi),$$

где  $\varphi = 0,02...0,03$  рад – текущий угол.

С учетом характеристической ширины щели согласно [6] средняя скорость жидкости в щелевом зазоре составит:

$$V_{cp} = \frac{1,667 \cdot V_{кр} \cdot \cos \varphi}{ctg^2 \cdot \frac{\varphi}{2} \cdot (1 - \cos \varphi)}.$$

Форма щели при круглом наружном и внутреннем шлифовании:

$$h(\varphi) = (R_0 \pm R_{кр}) \cdot (1 - \cos \varphi),$$

где  $R_0$  – радиус обрабатываемой детали; «+» – соответствует наружному, а «-» внутреннему шлифованию.

Анализ формы щели при круглом наружном и внутреннем шлифовании показывает, что при традиционных соотношениях радиусов шлифовального круга и детали, в пределах зоны гидродинамического влияния, средняя скорость течения жидкости может быть принятой одинаковой для всех схем шлифования.

В качестве характерного размера в данном случае принимается длина участка гидродинамического влияния. Для водных смазывающе-охлаждающих жидкостей этому участку при полученных средних скоростях течения соответствуют значения критерия Рейнольдса  $Re > 10^6$ . Таким образом, на этом участке имеет место развитый турбулентный режим течения.

Граничные условия для детали в зоне гидродинамического влияния можно записать в следующем виде:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_l (t_s - t_{жс}),$$

где  $\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене между поверхностью детали и турбулентным потоком смазывающе-охлаждающей жидкости,  $t_{жс}$  – температура смазывающе-охлаждающей жидкости.

Третий участок – это течение жидкости от точки ее падения на поверхность детали, которое происходит со скоростью близкой к скорости истечения из падающего сопла  $V_c$ . Характерным размером при этом является расстояние от среза подающего сопла до начала участка гидродинамического влияния. Для водных смазывающе-охлаждающих жидкостей этому участку соответствуют значения критерия Рейнольдса  $Re = (0,5...1)10^4$ . Такие значения критерия Рейнольдса при наружном обтекании соответствуют переходному режиму от ламинарного к турбулентному течению.

Граничные условия для детали в зоне свободного течения можно записать в следующем виде:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_2 (t_s - t_{жс}),$$

где  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене между поверхностью детали и потоком смазывающе-охлаждающей жидкости с переходным режимом течения.

**Выводы.** Смешанные граничные условия на поверхности детали, охлаждаемой СОЖ в процессе шлифования, должны учитывать наличие трех участков с различными режимами течения жидкости: в пределах зоны резания – участок ламинарного течения в капиллярах между связкой шлифовального круга и поверхностью резания, где характерным размером является величина зазора между связкой круга и обрабатываемой поверхностью; в пределах зоны гидродинамического влияния – участок турбулентного течения в клинообразном зазоре между шлифовальным кругом и деталью, скорость которого определяется гидродинамическими явлениями в системе этих тел, где характерным размером является длина этого участка; в пределах зоны свободного полива – участок детали в потоке, скорость которого определяется расходом смазывающе-охлаждающей жидкости и сечением подающего сопла, режим течения – переходной от ламинарного к турбулентному, а характерным размером является расстояние от среза подающего сопла до начала участка гидродинамического влияния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / под ред. С.Г.Энталиса, Э.М.Берлинера. – М.: Машиностроение, 1986. – 352с.: ил.
2. Худобин Л.В. Повышение эффективности действия СОЖ при внутреннем шлифовании / Худобин Л.В., Берзин В.Р., Мельников А.Н. – Вестник машиностроения. – 1975. – №11. – С.55-57.
3. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика / Башта Т.М. – М.: Машиностроение, 1971. – 82с.
4. Ящерицын П.И. Кавитационные явления при шлифовании / Ящерицын П.И., Бранкевич Э.С., Туромша В.И. – Известия АН БССР: Серия физико-технических наук. – 1981. – №4. – С.67-72.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкостей и газов / Лойцянский Л.Г. – М.: Наука, 1970. – 904с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Шлихтинг Г. – М.: Наука, 1974. – 711с.

*Поступила в редколлегию 01.06.2016.*