

УДК 621.923.001.42

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ПРИ НАРУЖНОМ БЕСЦЕНТРОВОМ ШЛИФОВАНИИ

М.Ю. Александрова, С.А. Добрынин, Г. И. Фирсов

В работе рассматривается процесс распространения тепла в поверхностных слоях обрабатываемой детали при бесцентровом наружном шлифовании колец подшипников.

Современное состояние и перспективы развития металлорежущих станков и автоматических линий характеризуются достаточно быстрой сменяемостью номенклатуры изготавливаемых изделий, что вызывает необходимость широкого использования информационных технологий в задачах проектирования металлорежущего оборудования и технологических процессов [1]. Одной из важных задач, встающих перед проектировщиками и технологами, является формирование такой последовательности технологических операций, которая обеспечила бы требуемое качество изделия при минимальной себестоимости обработки [2]. В связи с этим встает задача такого разбиения технологической операции на переходы и проходы, чтобы были обеспечены все требуемые значения точностных параметров при выполнении требований по экономическим критериям, в частности по числу однотипных станков в автоматической линии. В работе на примере выполнения требований к качеству поверхностного слоя наружных поверхностей колец подшипников рассмотрена задача выбора числа проходов при бесцентровом шлифовании.

Одной из причин, ограничивающих величину допуска, снимаемого за один проход, и, следовательно, регламентирующих число однотипных станков автоматической линии, является опасность возникновения фазовых и структурных превращений в поверхностных слоях шлифуемых колец [3, 4]. Представляется важным определить максимальную величину припуска, который может быть снят в процессе каждого прохода, не вызывая при этом фазовые и структурные превращения в поверхностных слоях окончательно обработанных колец.

Фазовые и структурные превращения, возникающие в поверхностных слоях шлифуемых изделий, обуславливаются высокими температурами, образующимися в зоне контакта режущего круга с кольцом.

Отдельные зерна шлифовального круга работают как маленькие резцы. Время нагрева малого участка изделия до  $900\text{—}1000^\circ$  составляет тысячные доли секунды. В следующее мгновение тепло быстро отводится в основную массу металла. Суммарное действие таких высокотемпературных очагов приводит к общему и, в некоторых случаях, значительному нагреву всего поверхностного слоя. Охлаждение шлифуемой детали жидкостями уменьшает общий нагрев поверхности, но не может заметно повлиять на скорость мгновенных нагревов и охлаждений поверхности, так как основная часть тепла отводится внутрь самого изделия.

Известно [5], что при грубом шлифовании изделий закаленная сталь при обработке шлифовальным кругом испытывает своеобразную закалку на аустенит. При этом, верхний закаленный слой лежит на слое сильно отпущенного металла, который по мере

углубления постепенно переходит через все стадии отпуска в исходную структуру закалки. Следовательно, при шлифовании возникают чисто термические процессы - отпуск и закалка.

Широкое исследование, связанное с изменением микроструктуры поверхностных слоев закаленной стали в результате шлифования, провел Б.И. Костецкий [6]. С помощью металлографических исследований, рентгеноструктурного анализа и измерения микротвердости в сечении поверхностных слоев Б.И. Костецкий сделал выводы о максимальных температурах шлифования. Им установлено, что при обычных условиях шлифования, температура в тонких поверхностных слоях металла превышает 800—900°С. По мнению Б.И. Костецкого изменение микроструктуры в поверхностных слоях шлифуемых изделий в основном обусловлено динамичностью термического процесса шлифования. Исследуя влияние глубины резания на изменение микроструктуры, Б.И. Костецкий установил, что при различных глубинах шлифования превращения микроструктуры имеют одинаковый характер и существенно отличаются только глубиной слоя измененной структуры. Им же установлено, что самый верхний слой металла после шлифования представляет собой вторично-закаленный слой, глубиной от 1 до 10 мкм, имеющий аустенито-мартенситную структуру. За ним лежит отпущенный слой, прошедший все последовательные стадии отпуска и имеющий структуру троостомартенсита. Полученные Б.И. Костецким данные хорошо согласуются с результатами исследования, приведенными в работе Л.Б. Альтшуллера и М.П. Сперанской [5].

В настоящее время общепризнано [7 — 9], что при резании металлов, в частности, при шлифовании значительная часть механической энергии превращается в тепло. Также установлено, что основная масса тепла, развивающегося в месте контакта режущего круга с изделием, расходуется на нагревание изделия, значительно повышая температуру его поверхностных слоев.

Таким образом, можно сделать важные для практики выводы:

1. Шлифование следует рассматривать не только в качестве механического процесса, но и в качестве термического.
2. Изменение микроструктуры поверхностных слоев закаленных стальных изделий влечет за собой изменение их физико-механических свойств, что во многих случаях понижает долговечность и качество выпускаемой продукции.
3. Для повышения долговечности и качества изделий, обрабатываемых на шлифовальных станках, величина снимаемого за один проход припуска должна быть, в первую очередь, обусловлена тепловыми явлениями, возникающими при шлифовании.

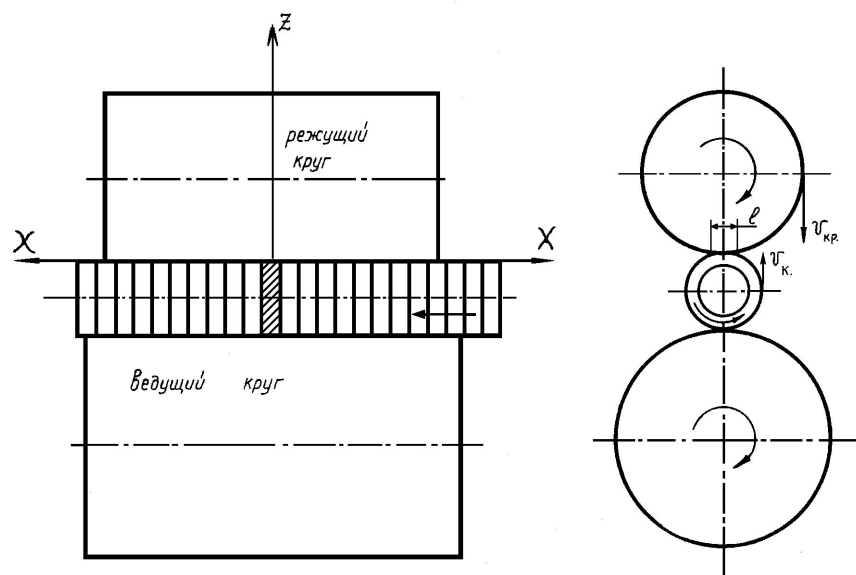


Рис. 1

Для исследования тепловых явлений, возникающих при сквозном бесцентровом шлифовании наружных цилиндрических поверхностей колец подшипников, рассмотрим схему шлифования, представленную на рис. 1. При сквозном бесцентровом шлифовании наружных цилиндрических поверхностей колец подшипников тепло концентрируется в месте контакта режущего круга с кольцом. Перемещаясь со скоростью  $V_k$ , каждая точка поверхности кольца подвергается непрерывному тепловому воздействию в течение времени  $\tau_0 = l/V_k$ , где  $l$  — длина дуги контакта шлифуемого кольца с режущим кругом. Величина  $l$  может быть рассчитана по формуле, предложенной Е.Н. Масловым [8]

$$l = \sqrt{\frac{Ddt}{D+d}},$$

где  $D$  — диаметр режущего круга,  $d$  — диаметр кольца,  $t$  — величина припуска, снимаемого за один оборот кольца.

Так как ширина режущего круга значительно больше высоты кольца, то действие теплового импульса, возникающего в месте контакта круга с кольцом можно употребить действию неограниченного вдоль оси мгновенного плоского сосредоточенного источника тепла, интенсивность  $q$  которого может быть определена как  $q = Q/Ht\tau_0$ . Здесь  $Q$  — количество тепла, выделившегося на площадке контакта круга с кольцом,  $H$  — высота кольца.

Процесс распространения тепла от мгновенного сосредоточенного источника является местным и протекает в ограниченном объеме металла. Кроме того, при шлифовании колец, проходящих зону резания непрерывным потоком, градиент температуры с торцевой поверхности колец близок к нулю.

В силу сказанного температурное поле в кольце, возникшее от воздействия мгновенного плоского источника тепла, будет одномерным, и дифференциальное уравнение теплопроводности запишется в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (1)$$

В уравнении (1) коэффициент  $\alpha$  является коэффициентом температуропроводности, характеризующим скорость выравнивания температуры при нестационарной

теплопроводности  $\alpha = \lambda/c\gamma$ , где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $c$  — удельная теплоемкость,  $\gamma$  — удельный вес. Для расчета процесса распространения тепла в кольце кроме дифференциального уравнения теплопроводности (1) необходимо задать краевые условия, т.е. начальное распределение температуры в кольце и условия теплообмена на его границах. В качестве начального распределения температуры в кольце примем, что температура кольца по всему сечению равна температуре окружающей среды.

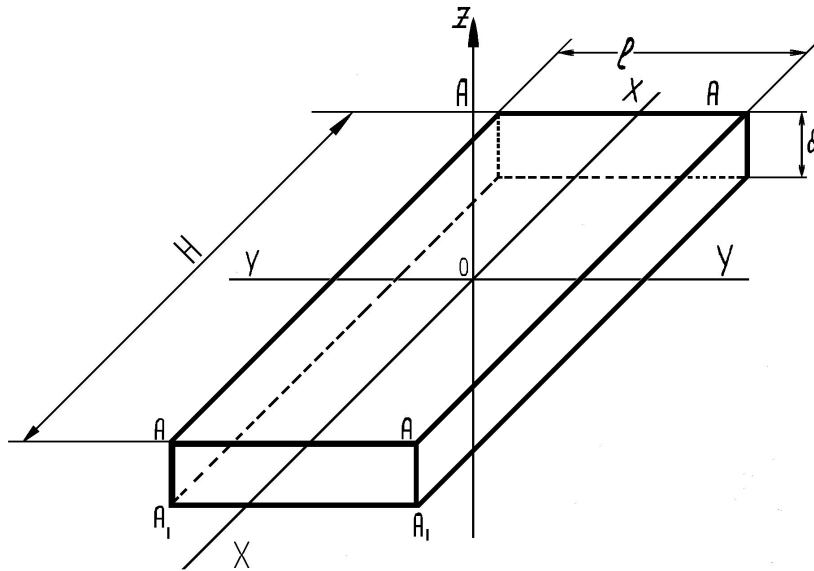


Рис. 2

Ранее было принято, что температурное поле в кольце от действия мгновенного плоского источника тепла является одномерным, т.е. что изменение температуры будет происходить только вдоль оси  $z$ . Вырежем элемент кольца с параметрами  $H$ ,  $l$ ,  $\delta$ , где  $\delta$  — толщина кольца. Зададим граничные условия для верхней и нижней плоскостей рассматриваемого элемента (рис. 2), при этом кривизной поверхностей можно пренебречь в силу малости величины  $l$ .

Учитывая, что  $\alpha \ll \lambda$ , т.е., что коэффициент  $\alpha$  значительно меньше коэффициента теплопроводности  $\lambda$  ( $\alpha/\lambda \rightarrow 0$ ) и время  $\tau_0$  составляет сотые доли секунды, можно принять верхние и нижние поверхности элемента в момент теплового импульса за адиабатические, т.е. за поверхности, не пропускающие тепло.

Задача определения температурного поля в элементе кольца, подвергнутого тепловому воздействию плоского источника тепла в течение времени  $\tau_0$ , математически может быть поставлена следующим образом. Дано: дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \text{ временное краевое условие } T_{\tau=0} = T_0, \text{ где } T_0 \text{ — температура окружающей}$$

среды, 1-ое граничное условие  $(\partial T/\partial t)_{t=0} = 0$ , 2-ое граничное условие  $(\partial T/\partial z)_{z=\delta} = 0$ . Следует определить температурную функцию  $T = \Phi(z, \tau)$ . Процесс распространения тепла от источника  $Q$  с интенсивностью  $q$  в элементе объема кольца с непроницаемыми теплом плоскостями будем рассматривать как часть процесса распространения тепла от того же источника в неограниченном теле. Используя метод дополнительных источников [10] и принцип независимости действия распределенных источников, запишем решение уравнения (1) в виде

$$T_{(\tau, 0 \leq z \leq \delta)} = \frac{2q}{c\gamma(4\pi\alpha\tau)^{1/2}} \left\{ \exp\left[-\frac{z^2}{4\alpha\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(2\delta - z)^2}{4\alpha\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(2\delta + z)^2}{4\alpha\tau}\right] \right\}.$$

Температурное поле от плоского источника тепла, действовавшего в течение времени  $\tau_1 = \tau_0$  может быть определено на основе следующего выражения:

$$T = \frac{q}{c\gamma(\pi\alpha)^{1/2}} \left\{ \int_0^{\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_1}} \exp\left[-\frac{z^2}{4\alpha(\tau - \tau_1)}\right] d\tau_1 + \int_0^{\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_1}} \exp\left[-\frac{(2\delta - z)^2}{4\alpha(\tau - \tau_1)}\right] d\tau_1 + \int_0^{\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_1}} \exp\left[-\frac{(2\delta + z)^2}{4\alpha(\tau - \tau_1)}\right] d\tau_1 \right\}.$$

Обозначим:

$$J_1 = \int_0^{\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_1}} \exp\left[-\frac{z^2}{4\alpha(\tau - \tau_1)}\right] d\tau_1;$$

$$J_2 = \int_0^{\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_1}} \exp\left[-\frac{(2\delta - z)^2}{4\alpha(\tau - \tau_1)}\right] d\tau_1;$$

$$J_3 = \int_0^{\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_1}} \exp\left[-\frac{(2\delta + z)^2}{4\alpha(\tau - \tau_1)}\right] d\tau_1.$$

Введем подстановку  $\frac{z^2}{4\alpha(\tau - \tau_1)} = u^2$ ,

тогда  $4\alpha(\tau - \tau_1) = \frac{z^2}{u^2}$ ;  $\tau - \tau_1 = \frac{z^2}{4\alpha u^2}$ ;  $\tau_1 = \tau - \frac{z^2}{4\alpha u^2}$  и  $d\tau_1 = \frac{z^2}{2\alpha u^3} du$ .

С учетом подстановки 1-й интеграл переписывается так:

$$J_1 = \int_{\frac{z}{2\sqrt{\alpha\tau}}}^{\frac{z}{2\sqrt{\alpha(\tau - \tau_1)}}} \frac{2u}{z} \sqrt{\alpha} \exp[-u^2] \frac{z^2}{2\alpha u^3} du, \quad (2)$$

где  $u_1 = \frac{z}{2\sqrt{\alpha\tau}}$  и  $u_2 = \frac{z}{2\sqrt{\alpha(\tau - \tau_0)}}$ .

Далее заметим, что  $\left[\frac{1}{u} \exp(-u^2)\right]_u^1 = -\frac{1}{u^2} \exp(-u^2) - 2 \exp(-u^2)$ , отсюда

$$\frac{1}{u^2} \exp(-u^2) = -2 \exp(-u^2) - \left[\frac{1}{u} \exp(-u^2)\right]_u^1.$$

Подставляя эти соотношения в (2), получим

$$J_1 = \frac{z}{\sqrt{\alpha}} \left\{ 2 \int_{u_2}^{u_1} \exp(-u^2) du + \int_{u_2}^{u_1} \left[ \frac{1}{u} \exp(-u^2) \right]_u^1 du \right\}. \quad (3)$$

Перепишем первое слагаемое правой части выражения (3) следующим образом:

$$J_1' = 2 \int_{u_2}^{u_1} \exp(-u^2) du = \sqrt{\pi} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{u_2}^{u_1} \exp(-u^2) du = \sqrt{\pi} [\Phi(u_1) - \Phi(u_2)], \quad (4)$$

где  $\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-u^2) du$  - табулированная функция Крампа [10].

Решением интеграла  $J_1'' = \int_{u_2}^{u_1} \left[ \frac{1}{u} \exp(-u^2) \right]_u^1 du$  будет:

$$J_1'' = \left[ \frac{1}{u} \exp(-u^2) \right]_{u_2}^{u_1} = \frac{1}{u_1} \exp(-u_1^2) - \frac{1}{u_2} \exp(-u_2^2).$$

Подставляя значения  $J_1'$  и  $J_1''$  в выражение (3), получим:

$$J_1 = J_1' + J_1'' = \frac{z}{\sqrt{\alpha}} \left\{ \sqrt{\pi} [\Phi(u_1) - \Phi(u_2)] + \frac{1}{u_1} \exp(-u_1^2) - \frac{1}{u_2} \exp(-u_2^2) \right\}.$$

Аналогично решая  $J_2$  и  $J_3$ , получим:

$$J_2 = \frac{(2\delta - z)}{\sqrt{\alpha}} \left\{ \sqrt{\pi} [\Phi(u_3) - \Phi(u_4)] + \frac{1}{u_3} \exp(-u_3^2) - \frac{1}{u_4} \exp(-u_4^2) \right\};$$

$$J_3 = \frac{(2\delta + z)}{\sqrt{\alpha}} \left\{ \sqrt{\pi} [\Phi(u_5) - \Phi(u_6)] + \frac{1}{u_5} \exp(-u_5^2) - \frac{1}{u_6} \exp(-u_6^2) \right\},$$

где

$$u_3 = \frac{2\delta - z}{2\sqrt{\alpha\tau}}; u_4 = \frac{2\delta - z}{2\sqrt{\alpha(\tau - \tau_0)}}; u_5 = \frac{2\delta + z}{2\sqrt{\alpha\tau}}; u_6 = \frac{2\delta + z}{2\sqrt{\alpha(\tau - \tau_0)}}.$$

Подставляя значения  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$  в выражения (2) — (4) после очевидных преобразований, получим формулу для определения процесса теплопроводности в виде:

$$\begin{aligned}
T_{(\tau, 0 \leq z \leq \delta)} = & \frac{q}{\lambda} \left\{ z \left[ \Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) - \Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha(\tau-\tau_0)}}\right) \right] + \frac{2\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\pi}} \left[ \sqrt{\tau} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha\tau}\right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - \sqrt{\tau-\tau_0} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha(\tau-\tau_0)}\right) \right] + (2\delta - z) \left[ \Phi\left(\frac{2\delta - z}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) - \Phi\left(\frac{2\delta - z}{2\sqrt{\alpha(\tau-\tau_0)}}\right) \right] + \right. \\
& \left. + \frac{2\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\pi}} \left[ \sqrt{\tau} \exp\left(-\frac{(2\delta - z)^2}{4\alpha\tau}\right) - \sqrt{\tau-\tau_0} \exp\left(-\frac{(2\delta - z)^2}{4\alpha(\tau-\tau_0)}\right) \right] + \right. \\
& (2\delta + z) \left[ \Phi\left(\frac{2\delta + z}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) - \Phi\left(\frac{2\delta + z}{2\sqrt{\alpha(\tau-\tau_0)}}\right) \right] + \\
& \left. + \frac{2\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\pi}} \left[ \sqrt{\tau} \exp\left(-\frac{(2\delta + z)^2}{4\alpha\tau}\right) - \sqrt{\tau-\tau_0} \exp\left(-\frac{(2\delta + z)^2}{4\alpha(\tau-\tau_0)}\right) \right] \right\}.
\end{aligned}$$

В конце процесса нагрева ( $\tau = \tau_0$ ) температурное поле в элементе объема кольца имеет вид:

$$\begin{aligned}
T_{(\tau=\tau_0, 0 \leq z \leq \delta)} = & \frac{q}{\lambda} \left\{ z \left[ \Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha\tau_0}}\right) - 1 \right] + (2\delta - z) \left[ \Phi\left(\frac{2\delta - z}{2\sqrt{\alpha\tau_0}}\right) - 1 \right] + \right. \\
& \left. + (2\delta + z) \left[ \Phi\left(\frac{2\delta + z}{2\sqrt{\alpha\tau_0}}\right) - 1 \right] + \frac{2\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\pi}} \left[ \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha\tau_0}\right) + \exp\left(-\frac{(2\delta - z)^2}{4\alpha\tau_0}\right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \exp\left(-\frac{(2\delta + z)^2}{4\alpha\tau_0}\right) \right] \right\}.
\end{aligned} \quad (5)$$

Подставив в уравнение (5)  $z = 0$ , получим выражение для максимальной контактной температуры на поверхности кольца:

$$T_{\max(\tau=\tau_0, z=0)} = \frac{2q}{\lambda} \left\{ 2\delta \left[ \Phi\left(\frac{\delta}{\sqrt{\alpha\tau_0}}\right) - 1 \right] + \frac{\sqrt{\alpha\tau_0}}{\sqrt{\pi}} \left[ 1 + 2 \exp\left(-\frac{\delta^2}{\alpha\tau_0}\right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Формула (6) позволяет рассчитывать максимальную температуру на поверхности шлифуемого кольца, если известны числовые значения величин, входящих в правую часть выражения (6).

### Литература

1. Давыдов В.М., Кабалдин Ю.Г. Концептуальное проектирование мехатронных модулей металлообработки. — Владивосток: Дальнаука, 2003. — 251 с.
2. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Под ред. д.т.н. А.М. Дальского, — М.: Изд-во МАИ, 2000. — 364 с.

3. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 144 с.
4. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. — Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1975. — 128 с.
5. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей. — Минск: Наука и техника, 1971. — 212 с.
6. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. — Киев: Техника, 1970. — 394 с.
7. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. — М.: Высшая школа, 1985. — 304 с.
8. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. — М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.
9. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. — М.: Машиностроение, 1978. — 167 с.
10. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Москва, Россия.*

*Поступила: 11.08.08.*