

УДК 621.9: 658.5

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ И ТЕМПЕРАТУРАМИ В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ

Т.Г.Ивченко, Д.М. Шелкунова, Полякова Е.В.
Донецкий национальный технический университет
E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

Одним из наиболее перспективных методов повышения качества обработанной поверхности деталей машин при механообработке является отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием (ППД). В связи с этим весьма актуальны исследования алмазного выглаживания, получившее достаточно большое распространение, прежде всего, при обработке материалов высокой твердости.

В формировании поверхностного слоя деталей важнейшую роль играют тепловые явления в зоне обработки ППД, так как процесс пластического деформирования сопровождается интенсивным тепловыделением и повышением температуры контактных поверхностей инструмента и детали. В настоящее время методы исследований теплового состояния зоны обработки достаточно хорошо разработаны. Однако, существующая методика определения тепловых потоков на первом этапе теплофизического анализа [1, 2], весьма затруднительна для практического применения. Имеющиеся сведения о закономерностях формирования тепловых потоков в зоне резания распространяются в основном на лезвийную обработку [3], информация о методах обработки ППД практически отсутствует.

Задача определения температурных полей в детали и инструменте вполне успешно решается с использованием метода источников теплоты [1, 2, 4], который характеризуется достаточной простотой и наглядностью в сравнении с другими аналитическими и численными методами. При алмазном выглаживании основное внимание необходимо уделять исследованию теплового состояния де-

тали, так как именно качество ее поверхностного слоя, зависящего от температуры, должно быть обеспечено на операциях окончательной обработки ППД.

Цель представляемой работы – анализ закономерностей формирования и путей управления тепловыми потоками и температурами в зоне обработки при алмазном выглаживании.

Основным источником теплоты, выделяющейся в процессе алмазного выглаживания, является работа сил упругопластического деформирования материала обрабатываемой детали.

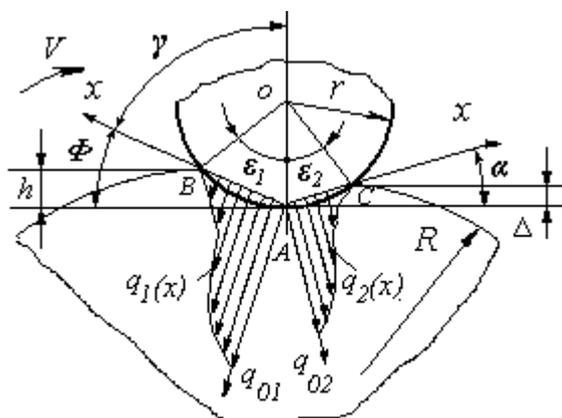


Рис. 1 Схематизация процесса алмазного выглаживания

В процессе алмазного выглаживания детали радиуса R , вращающейся со скоростью V (рис.1.), алмазный индентор, имеющий форму сферы радиусом r , пластически деформирует материал на глубину h . Величина Δ представляет собой упругое восстановление материала детали после прохода инструмента. Вся длина контакта между инструментом и деталью

ABC делится на два участка, называемых по аналогии с режущим инструментом передней поверхностью AB (определяемой углами Φ , γ и ε_1) и задней AC (определяемой углами α и ε_2).

Проекция контактной площадки между сферической рабочей частью инструмента и цилиндрической поверхностью детали при статическом вдавливании имеет форму эллипса. Вследствие движения индентора и деформации материала детали форма поверхности контакта отличается от эллипса, однако с достаточной точностью контактную поверхность можно заменить прямоугольником шириной b (в направлении движения подачи индентора S) и длиной $l = (l_1 + l_2)$, где l_1 – длина контакта по передней поверхности (дуга AB), l_2 – по задней (дуга AC).

Углы контакта ε_1 и ε_2 определяются условиями упругопластического деформирования поверхностного слоя. Так для закаленных сталей при сглаживающем режиме обработки $\varepsilon_1 = 6 - 7^\circ$; для мягких материалов - $\varepsilon_1 = 2 - 3^\circ$ [2].

Вследствие малости углов ε_1 и ε_2 дуги AB и AC могут быть заменены соответствующими хордами. Зная углы контакта ε_1 и ε_2 , а так же принимая $\varepsilon_1 = 0,5\varepsilon_2$, для расчета размеров площадки можно использовать формулы:

$$l_1 = 0,017 r \varepsilon_1; l_2 = 0,009 r \varepsilon_1; b = (l_1 + l_2) \sqrt{(R+r)/R}. \quad (1)$$

Силы, действующие на контактных площадках bxl_1 и bxl_2 на передней и задней поверхностях индентора, определяются следующим образом:

$$F_1 = P_T - F_2; F_2 = 0,25bl_2\mu\sigma_s, \quad (2)$$

где P_T - тангенциальная сила, действующая в направлении скорости главного движения, определяемая в зависимости от радиальной силы выглаживания P .

При схематизации компонентов исследуемой системы деталь рассматривается как полупространство, инструмент – как полуограниченный стержень, имеющий конфигурацию зоны контакта инструмента и детали.

Источники теплоты при алмазном выглаживании рассматриваются как плоские прямоугольные, стационарные, так как процесс теплообмена при выглаживании достаточно быстро устанавливается. Источники теплоты являются неподвижными для инструмента и быстро движущимися для детали.

В зоне обработки возникают два основных источника теплоты: q_{1T} - в зоне пластической деформации на передней поверхности AB и q_{2T} - в зоне упругого восстановления на задней поверхности BC (максимальные интенсивности источников q_{01} и q_{02}). Принимается, что законы распределения интенсивности источников несимметричные нормальные:

$$\begin{aligned} q_{1T} &= q_{01} \exp\left[-3(1-x)^2\right]; & q_{2T} &= q_{02} \exp\left[-3x^2\right]; & (3) \\ q_{01} &= F_1V/bl_1 = (P_T - F_2)V/bl_1; & q_{02} &= \sqrt{3}F_2V/2\sqrt{\pi}bl_2. \end{aligned}$$

Теплота каждого из источников передается детали и индентору. Плотности тепловых потоков (стоков), направленных из детали в инструмент, на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора принимаются равномерно распределенными.

Плотности равномерно распределенных по площадкам bxl_1 и bxl_2 тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора, определяются из системы уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{q_1 l_1}{\lambda_u} M_1 + \frac{q_2 l_2}{\lambda_u} N_2 = K_1 (K_c q_{01} - q_1) ; \\ \frac{q_2 l_2}{\lambda_u} M_2 + \frac{q_1 l_1}{\lambda_u} N_1 = [K_2 - K_1 (q_2 \sqrt{\beta} + \chi_2 q_1)] , \end{cases} \quad (4)$$

$$K_1 = 4K_o \sqrt{\omega_\delta l_1} / 3\lambda_\delta \sqrt{V} , \quad K_2 = K_c K_1 (q_{02} \sqrt{\beta} + \chi_1 q_{01}) ,$$

где $\lambda_\delta, \lambda_u, \omega_\delta, \omega_u$ – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента соответственно; M_1, M_2, N_1, N_2 – безразмерные функции, определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях инструмента; K_o – коэффициент, учитывающий ограниченность источника по ширине b , $K_o = 0,87$; K_c – коэффициент формы для двумерного быстро движущегося источника с несимметричным нормальным распределением, учитывающий отличие от источника с равномерным распределением, $K_c = 0,55$; коэффициент $\beta = l_2/l_1$; коэффициенты $\chi_1 = 0,6, \chi_2 = 0,75$ [2].

Безразмерные функции, определяющие нагрев контактных площадок:

$$M_{1,2} = 0,061 + 0,033 \eta_{1,2}^{0,5} \lg \eta_{1,2}; \quad N_{1,2} = 0,0573 \eta_{1,2} \rho_{1,2}^{-1/\eta_{1,2}^{0,66}} , \quad (5)$$

где η – безразмерная ширина $\eta_1 = b/l_1, \eta_2 = b/l_2 (\eta_{1,2} > 1)$; $\rho_1 = 1 + l_2/l_1; \rho_2 = 1 + l_1/l_2$.

В результате решения системы (4) определены плотности тепловых потоков (стоков), направленных из детали в инструмент, на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора:

$$q_1 = \frac{[K_2 N_2 - K_c K_1 q_{01} (N_2 I - M_2)] \lambda_u}{l_1 (N_1 N_2 - M_1 M_2 - M_1 N_2 I) - K_1 \lambda_u (M_2 + N_2 I - N_2 \chi_2)}; \quad (6)$$

$$q_2 = \frac{K_1 \lambda_u (K_c q_{01} - q_1) - M_1 q_1 l_1}{N_2 l_2}; \quad I = \frac{K_1 \lambda_u \sqrt{\beta}}{N_2 l_2}. \quad (7)$$

Закономерности изменения тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора в зависимости от параметров процесса выглаживания - радиуса индентора r и усилия выглаживания P представлены на рис. 2.

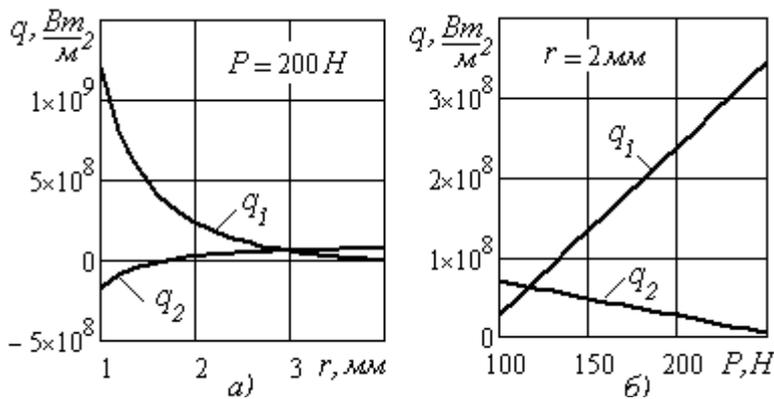


Рис. 2. Графики изменения плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора от радиуса индентора r – а) и усилия выглаживания P – б)

Расчеты выполнялись для следующих условий: обрабатываемый материал - сталь 45 ($\sigma_s = 750$ Мпа); диаметр детали $d = 200$ мм; скорость $V = 3$ м/с.

С увеличением радиуса индентора тепловой поток на передней поверхности q_1 резко уменьшается, на задней q_2 – незначительно увеличивается, что объясняется улучшением теплоотвода в индентор при увеличении его размеров. С ростом усилия выглаживания тепловой поток на передней поверхности q_1 значительно возрастает, на задней q_2 – уменьшается.

Это связано с увеличением общего количества теплоты, выделяемого при выглаживании.

На основании полученных аналитических выражений (7) и (8) могут быть рассчитаны тепловые потоки на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора для любых условий алмазного выглаживания.

При анализе температур в зоне обработки на операциях алмазного выглаживания необходимо, прежде всего, рассматривать деталь, так как именно к ка-

честву ее поверхностного слоя предъявляются основные технологические требования.

Общее распределение температур в детали при выглаживании определяется суммой всех действующих в зоне обработки источников:

$$\Theta_{\Sigma}(x, y) = \Theta_1(x, y) + \Theta_2(x, y) - \Theta_3(x, y) - \Theta_4(x, y), \quad (8)$$

где $\Theta_1(x, y)$ - распределение температур, возникающее под действием источника теплоты q_{01} в зоне пластической деформации на передней поверхности индентора; $\Theta_2(x, y)$ - под действием источника теплоты q_{02} в зоне упругого восстановления на задней поверхности индентора; $\Theta_3(x, y)$ - под действием стока теплоты из детали в инструмент на передней поверхности индентора q_1 ; $\Theta_4(x, y)$ - под действием стока теплоты из детали в инструмент на задней поверхности индентора q_2 .

При описании температурного поля в детали в соответствии с методом источников используются известное аналитическое выражение для полосового быстродвижущегося источника, в котором его ограниченность по ширине учитывается поправочным коэффициентом K_o (в области практически применяемых условий выглаживания принимается $K_o = 0,87$) [1]:

$$\Theta_i(x, y) = PT(\psi, \nu) = \frac{K_o l_1 q_{01} n_i}{2\lambda_{\partial} \sqrt{\pi Pe}} \int_0^{\Delta} \frac{f(\psi_u) d\psi_u}{\sqrt{\psi - \psi_u}} \exp\left(-\frac{Pe}{4} \frac{\nu^2}{\psi - \psi_u}\right). \quad (9)$$

где $\psi = x/l_1$, $\psi_u = x_u/l_1$, $\nu = y/l_1$, - безразмерные координаты; $n_i = q_i/q_{01}$ - безразмерные величины, учитывающие различие тепловых потоков: $n_1 = 1$, $n_2 = q_{02}/q_{01}$, $n_3 = q_1/q_{01}$, $n_4 = q_2/q_{01}$; Δ - верхний предел интеграла: $\Delta = \psi$ при $0 \leq \psi \leq 1$ и $\Delta = 1$ при $\psi > 1$; $f(\psi_u)$ - закон распределения плотности теплового потока; $P = K_o l_1 q_1 / 2\lambda_{\partial} (\pi Pe)^{0,5}$ - размерный коэффициент; $Pe = Vl_1/\omega_{\partial}$ - критерий Пекле.

Закономерности формирования температур на поверхности детали ($y = 0$) при выглаживании, возникающих под воздействием различных тепловых потоков, представлены на рис.3. Распределение температур под воздействием источников теплоты q_{01} в зоне пластической деформации и источника теплоты q_{02}

в зоне упругого восстановления $\Theta_{12}(x,y) = \Theta_1(x,y) + \Theta_2(x,y)$, причем тепло от источника на задней поверхности индентора не распространяется на переднюю поверхность. Распределение температур под воздействием источников теплоты на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора $\Theta_{34}(x,y) = \Theta_3(x,y) + \Theta_4(x,y)$, причем тепло от источника на задней поверхности индентора также не распространяется на переднюю поверхность.

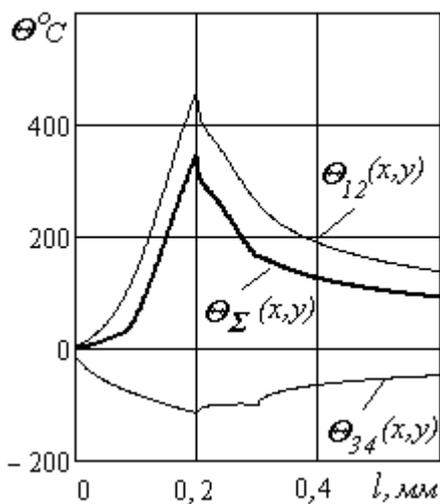


Рис. 3. Графики распределения температур по поверхности детали при выглаживании

Графики суммарного распределения температур по поверхности детали представлены на рис.4. Температуры $\Theta_{34}(x,y)$ условно показаны в области отрицательных значений, так как тепловые потоки q_1 и q_2 направлены противоположно потокам q_{01} и q_{02} . Следовательно, за счет стока теплоты в инструмент деталь охлаждается.

Представленные зависимости позволяют установить координаты точек на поверхности детали, имеющих максимальную температуру. Для нормального несимметричного, а также для равномерного законов распределения плотности теплового потока с функциями распределения $f(\psi_u) = \exp[-3(1 - \psi_u^2)]$ и $f(\psi_u) = 1$ наибольшее значение безразмерной температуры достигается при безразмерных координатах $\psi = 1$ и $v = 0$.

$$\Theta_{\Sigma \max}(x,y) = P \left[\int_0^1 \frac{\Delta e^{-3(1-\psi_u)^2}}{\sqrt{1-\psi_u}} d\psi_u e^{\left(-\frac{Pe v^2}{4(1-\psi_u)}\right)} + \int_0^1 \frac{\Delta n_3 d\psi_u}{\sqrt{1-\psi_u}} e^{\left(-\frac{Pe v^2}{4(1-\psi_u)}\right)} \right]. \quad (10)$$

На рис. 4 представлены графики зависимости максимальной температуры поверхности детали $\Theta_{\Sigma \max}$ от радиуса индентора при различных значениях усилия выглаживания: $P = 100H$ (кривая 1), $P = 150H$ (кривая 2) и $P = 200H$ (кривая 3).

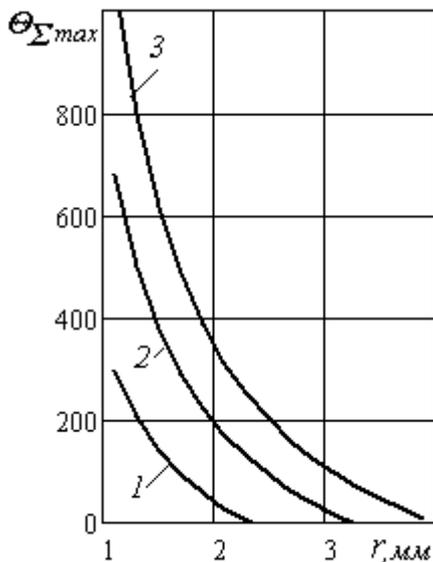


Рис.4. Графики зависимости максимальной температуры поверхности детали $\Theta_{\Sigma max}$ от радиуса индентора r

Как следует из графиков, при малых радиусах индентора и значительных усилиях выглаживания максимальная температура на поверхности детали весьма велика и может достигать 1000°C . При увеличении радиуса индентора и снижением усилия выглаживания максимальная температура достаточно быстро уменьшается, что объясняется улучшением условий теплоотвода в индентор и снижением общего количества выделяемого тепла.

Таким образом, разработана методика расчета тепловых потоков и температур в зоне обработки при алмазном выглаживании. Исследовано влияние на тепловые потоки и температуры параметров процесса выглаживания - радиуса индентора и усилия выглаживания, что позволяет управлять тепловым состоянием детали и снижать ее температуру.

Разработанная методика быть широко использована для других видов отделочно-упрочняющей обработки ППД.

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. - М.: Машиностроение, 1990. –288с.

2. Резников А.Н. Теплофизика резания. - М.: Машиностроение, 1969. –290с.

3. Ивченко Т.Г. Исследование закономерностей формирования тепловых потоков зоне резания при точении // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип.20. – Краматорськ: ДДМА, 2006.- С.88-94.

4. Ивченко Т.Г. Анализ закономерностей изменения температурного поля режущего инструмента в процессе его эксплуатации // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2009. Вып. 37. – С.84 - 89.