

УДК 621.9: 658.5

Т.Г. ИВЧЕНКО (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР
В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ**

Разработана методика расчета и выполнен анализ закономерностей формирования тепловых потоков и распределения температур в зоне обработки при алмазном выглаживании. Установлены характер и степень влияния параметров процесса выглаживания на тепловые потоки, а также особенности распределения температур на поверхности детали и по ее глубине.

тепловой поток, температура, алмазное выглаживание, метод источников**Введение**

Тепловые явления в зоне обработки поверхностно-пластическим деформированием (ППД) играют важную роль в формировании поверхностного слоя детали, так как при деформировании металлов выделяется достаточно большое количество теплоты. В связи с этим весьма актуальны исследования тепловых процессов при алмазном выглаживании, которое имеет достаточно большое распространение, прежде всего, при обработке материалов высокой твердости.

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, 4], 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], который характеризуется достаточной простотой и наглядностью в сравнении с другими аналитическими и численными методами. Результаты исследований, представленные в работе [5], позволяют установить общие закономерности формирования температурного поля режущего инструмента и изменения температуры резания в различных условиях обработки, в том числе с учетом изменяющегося в процессе эксплуатации износа лезвия. Однако сведения, представленные в этих работах, не охватывают область обработки ППД. Для этих методов представляет интерес дальнейшее развитие методики расчетов тепловых потоков и температур в зоне обработки. При этом основное внимание необходимо уделять исследованию теплового состояния детали, так как именно качество ее поверхностного слоя, зависящего от температуры, должно быть обеспечено на операциях окончательной обработки ППД, в том числе – обработкой алмазным выглаживанием.

Цель представляемой работы – разработка методики расчета и анализ закономерностей формирования тепловых потоков и температур в зоне обработки при алмазном выглаживании.

Основное содержание и результаты работы

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

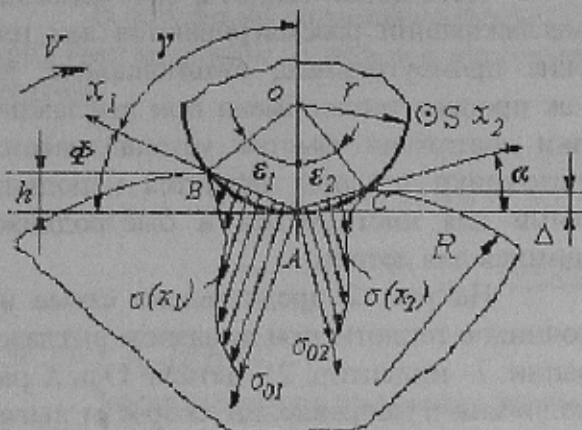


Рис. 1. Схематизация процесса алмазного выглаживания

В процессе алмазного выглаживания детали радиуса R , вращающейся со скоростью V (рис.1), алмазный индентор, имеющий форму сферы радиусом r , перемещается в направлении подачи S и 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).

Распределения напряжений на передней $\sigma(x_1)$ и задней $\sigma(x_2)$ площадках контакта индентора и детали при алмазном выглаживании подчиняются несимметричному нормальному закону: $\sigma(x) = \sigma_0 \exp[-3x^2]$. В таком случае сила нормального давления N и сила трения F (для $\sigma_0 = 0,5\sigma_s$) на этих площадках определяются следующим образом [2]:

$$N = 0,5\sigma_s b \int_0^l \exp[-3x^2] dx = 0,25bl\sigma_s; \quad F = 0,25bl\mu\sigma_s, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения; σ_s – предел прочности материала детали; b , l – размеры (ширина и длина) площадок контакта индентора и детали.

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:

$$l_1 = 0,017 r \varepsilon_1; \quad l_2 = 0,009 r \varepsilon_1; \quad b = (l_1 + l_2) \sqrt{(R+r)} / R. \quad (2)$$

Силы трения на передней F_1 и задней F_2 поверхностях индентора, действующие на контактных площадках bx_1 и bx_2 , определяются следующим образом:

$$F_1 = P_T - F_2; \quad F_2 = 0,25bl_2\mu\sigma_s, \quad (3)$$

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.

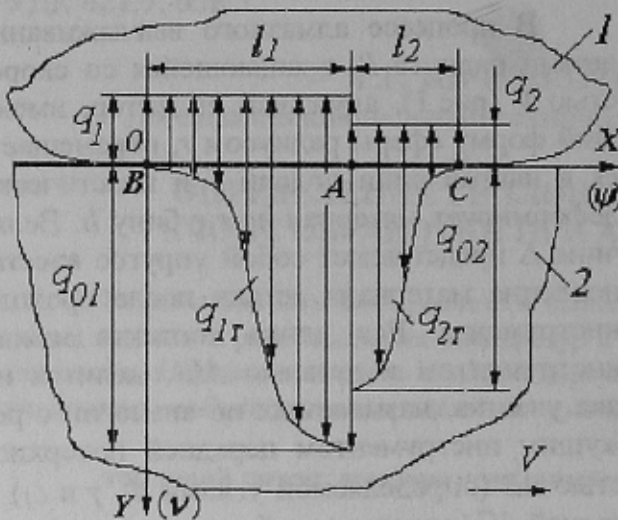


Рис.2. Схематизация источников теплоты при алмазном выглаживании

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.

На рис. 2 представлена схема источников теплоты при алмазном выглаживании: 1- индентор, 2 - деталь. Ось X расположена в направлении скорости выглаживания V, ось Y – по глубине 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:

$$\begin{aligned} q_{1T} &= q_{01} \exp\left[-3(1-x)^2\right]; & q_{2T} &= q_{02} \exp\left[-3x^2\right]; \\ q_{01} &= F_1 V / b l_1 = (P_T - F_2) V / b l_1; & q_{02} &= \sqrt{3} F_2 V / 2 \sqrt{\pi} b l_2. \end{aligned} \quad (4)$$

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 $b x l_1$ и $b x l_2$ тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора, определяются из системы уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{q_1 l_1}{\lambda_e} M_1 + \frac{q_2 l_2}{\lambda_e} N_2 = K_1 (K_c q_{01} - q_1); \\ \frac{q_2 l_2}{\lambda_e} M_2 + \frac{q_1 l_1}{\lambda_e} N_1 = [K_2 - K_1 (q_2 \sqrt{\beta} + \chi_2 q_1)] \end{cases}, \quad (5)$$

где $K_1 = 4 K_o \sqrt{\omega_a l_1} / 3 \lambda_a \sqrt{V}$, $K_2 = K_c K_1 (q_{02} \sqrt{\beta} + \chi_1 q_{01})$; $\lambda_d, \lambda_u, \omega_d, \omega_u$ – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента соответственно; 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]; M_1, M_2, N_1, N_2 - безразмерные функции, определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях инструмента:

$$M_{1,2} = 0,061 + 0,033 \eta_{1,2}^{0,5} \lg \eta_{1,2}; \quad N_{1,2} = 0,0573 \eta_{1,2} \rho_{1,2}^{-1/\eta_{1,2}^{0,66}}, \quad (6)$$

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 (5) определены плотности тепловых потоков (стоков), направленных из детали в инструмент, на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора:

$$q_1 = \frac{[K_2 N_2 - K_c K_1 q_{01} (N_2 I - M_2)] \lambda_u}{l_1 (N_1 N_2 - M_1 M_2 - M_1 N_2 I) - K_1 \lambda_u (M_2 + N_2 I - N_2 \chi_2)}; \quad (7)$$

$$q_2 = \frac{K_1 \lambda_u (K_c q_{01} - q_1) - M_1 q_1 l_1}{N_2 l_2}, \quad (8)$$

где $I = K_1 \lambda_u \sqrt{\beta} / N_2 l_2$.

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. 3.

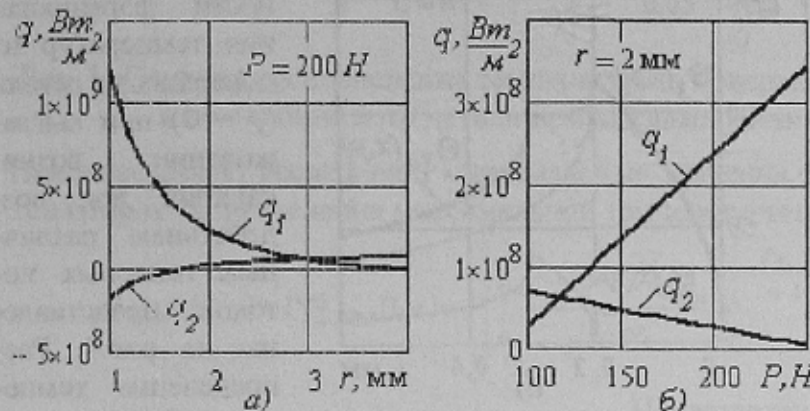


Рис. 3. Графики изменения плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях индентора от радиуса индентора r (а) и усилия выглаживания P (б)

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 качеству ее поверхностного слоя предъявляются основные технологические требования.

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

$$\Theta_{\Sigma}(x, y) = \Theta_1(x, y) + \Theta_2(x, y) - \Theta_3(x, y) - \Theta_4(x, y), \quad (9)$$

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 используется известное аналитическое выражение для полосового быстродействующего источника, в котором его ограниченность по ширине учитывается поправочным коэффициентом $K_o = 0,87$ [1]:

$$\Theta_i(x, y) = PT(\psi, \nu) = \frac{K_o l_1 q_{oi} n_i}{2\lambda_o \sqrt{\pi Pe}} \int_0^\Delta \frac{f_i(\psi_u) d\psi_u}{\sqrt{\psi - \psi_u}} \exp\left(-\frac{Pe}{4} \frac{\nu^2}{\psi - \psi_u}\right) \quad (10)$$

где $\psi = x/l_1$, $\psi_u = x_u/l_1$, $\nu = y/l_1$ - безразмерные координаты, $n_i = q_i/q_{oi}$ - безразмерные величины, учитывающие различие тепловых потоков: $n_1 = 1$, $n_2 = q_{o2}/q_{o1}$, $n_3 = q_1/q_{o1}$, $n_4 = q_2/q_{o1}$; Δ - верхний предел интеграла: $\Delta = \psi$ при $0 \leq \psi \leq 1$ и $\Delta = 1$ при $\psi > 1$; $f_i(\psi_u)$ - законы распределения плотности тепловых потоков; $P = K_o l_1 q_1 / 2\lambda_o (\pi Pe)^{0,5}$ - размерный коэффициент; $Pe = Vl_1/\omega_\delta$ - критерий Пекле.

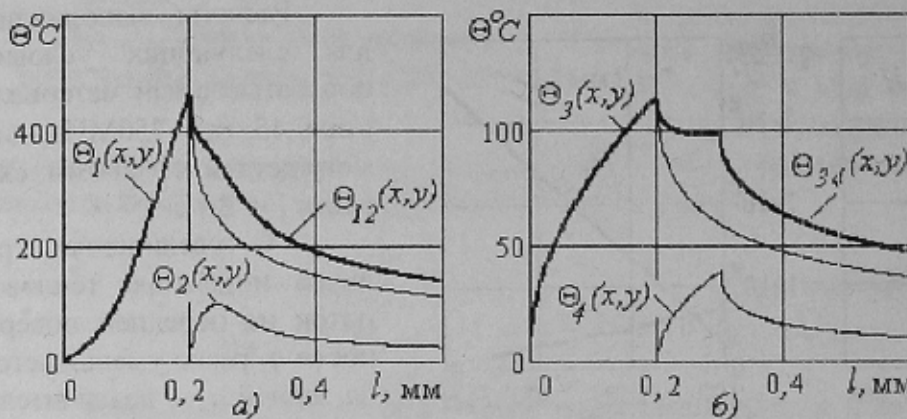


Рис. 4. Графики распределения температур на поверхности детали при выглаживании, возникающих под действием источников q_{1T} и q_{2T} (а) и стоков теплоты q_1 и q_2 (б)

Закономерности формирования температур на поверхности детали ($y = 0$) при выглаживании, возникающих под воздействием различных тепловых потоков, представлены на рис.4. Распределение температур $\Theta_1(x,y)$ соответствует нормальному несимметричному закону рас-

пределения плотности теплового потока с функцией распределения $f_1(\psi_u) = \exp[-3(1 - \psi_u^2)]$, распределение $\Theta_2(x,y)$ - нормальному несимметричному закону распределения $f_2(\psi_u) = \exp[-3\psi_u^2]$. Общее распределение температур под воздействием источников теплоты q_{o1} в зоне пластической деформации и источника теплоты q_{o2} 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.

Распределения температур $\Theta_3(x,y)$ и $\Theta_4(x,y)$ соответствуют равномерному закону распределения плотности теплового потока с функцией $f_3(\psi_u) = f_4(\psi_u) = 1$. Общее 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.

Графики суммарного распределения температур по поверхности детали представлены на рис.5а. Температуры $\Theta_{34}(x,y)$ условно показаны в области отрицательных значений, так как тепловые потоки q_1 и q_2 направлены противоположно потокам q_{o1} и q_{o2} . 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 $\nu = 0$.

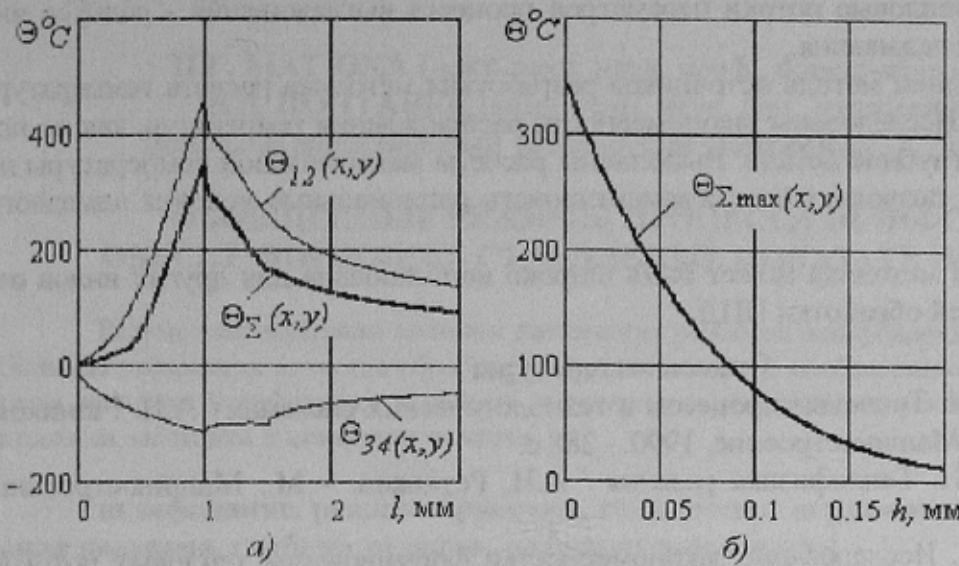


Рис. 5. Графики распределения температур по поверхности l (а) и по глубине h (б) детали при выглаживании

Наиболее важно исследовать максимальные значения температур. На рис. 5б представлен график распределения максимальной температуры по глубине детали h при $x = l$:

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

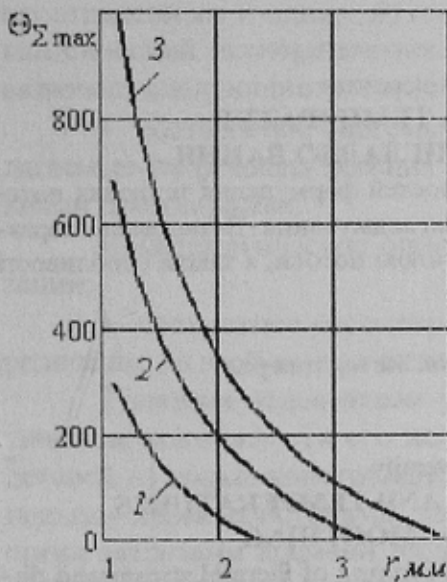


Рис.6. Графики зависимости максимальной температуры поверхности детали $\Theta_{\Sigma, \max}$ от радиуса индентора r

Представленные графики свидетельствуют о том, что кривая температур по глубине поверхности достаточно быстро убывает, причем уже при $h = 0,2$ мм становится практически равной нулю. Следовательно, поверхностный слой заготовки при алмазном выглаживании прогревается лишь на незначительную глубину.

На рис. 6 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). Как следует из графиков, при малых радиусах индентора и значительных усилиях выглаживания максимальная температура на поверхности детали весьма велика и может достигать $1000^{\circ}C$. 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.

Выводы

На основании анализа теплового состояния инструмента и детали разработана методика расчета тепловых потоков в зоне обработки при алмазном выглаживании. Установлены общие закономерности формирования тепловых потоков с учетом источников

В результате расчетов определена максимальная температура $\Theta_{\Sigma, \max}(x, y) = 347,8^{\circ}C$ при значениях $x = l$ и $y = 0$.

При исследовании закономерностей формирования остаточных напряжений в поверхностном слое детали значительный интерес представляет изменение температуры по глубине детали.

теплоты, действующих на передней и задней поверхностях алмазного индентора. Исследовано влияние на тепловые потоки параметров процесса выглаживания - радиуса индентора и усилия выглаживания.

С использованием метода источников разработана методика расчета температурных полей в детали. Исследованы закономерности распределения температур, как по поверхности, так и по глубине детали. Выполнены расчеты максимальной температуры на поверхности детали, позволяющие регламентировать рациональные условия алмазного выглаживания.

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

Список литературы

1. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
3. Ивченко Т.Г. Исследование закономерностей формирования тепловых потоков в зоне резания при точении / Т.Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – 2006. – Вип.20. – С. 88 – 94.
4. Ивченко Т.Г. Влияние условий обработки на закономерности формирования тепловых потоков в зоне резания при точении / Т.Г. Ивченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2008. – Вип. 5. – С. 23 – 29.
5. Ивченко Т.Г. Анализ закономерностей изменения температурного поля режущего инструмента в процессе его эксплуатации / Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2009. – Вып. 37. – С. 84 – 89.

Т.Г. ІВЧЕНКО

Донецький національний технічний університет ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ТА ТЕМПЕРАТУР В ЗОНІ ОБРОБКИ ППД ЧАС АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ

Розроблено методику розрахунку та аналізу закономірностей формування теплових потоків і розподілу температур в зоні обробки під час алмазного вигладжування. Встановлені характер та ступінь впливу параметрів процесу вигладжування на теплові потоки, а також особливості розподілу температур на поверхні деталі та по її глибині.

тепловий потік, температура, алмазне вигладжування, метод джерел

T.G. IVCHENKO

Donetsk National Technical University DETERMINATION OF THE THERMAL STREAMS AND TEMPERATURES IN AREA OF TREATMENT AT DIAMOND SMOOTHING

The method of calculation is developed and the analysis of forming of thermal streams and distributing of temperatures is executed in the area of treatment at the diamond. Character and degree of influence of parameters of smoothing process is set on thermal streams, and also features of distributing of temperatures on the spot detail and on its depth.

thermal stream, temperature, diamond smoothing, method of sources