

УДК [621.7+621.9](082)

ББК 30.61я.43

С56

Редакционная коллегия:

С.А. Астапчик (гл. ред.),

А.И. Гордиенко (зам. гл. ред.),

А.П. Ласковнев (зам. гл. ред.)

А.В. Белый (зам. гл. ред.),

В.М. Гришанович, Н.В. Райченок,

Е.А. Маковец

Рецензенты:

д-р техн. наук, академик П.А. Витязь

д-р техн. наук, академик А.П. Достанко

С 56

Современные методы и технологии создания и обработки материалов: VI Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 14–16 сентября 2011 г.): сб. материалов. В 3 кн. Кн. 2. Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование инженерии поверхностей / ред. коллегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2011. – 434 с. : ил.

ISBN 978-985-6441-25-0

Вторая книга посвящена исследованию влияния скоростных методов воздействия (электротермической, электронно-лучевой, лазерной, ионно-лучевой, ультразвуковой обработки) на физико-механические свойства сплавов на основе железа и алюминия, коррозионнотойких, жаростойких, литых цветных и черных металлов, в т.ч. легированных наночастицами, композиционных и полимерных материалов, неразъемных соединений. Рассматриваются структура и фазовый состав ионно-плазменных композиционных покрытий, высокопрочных поверхностных слоев инструментальных сталей и деталей машин, покрытий из алмазоподобного углерода.

УДК [621.7+621.9](082)

ББК 30.61я.43

ISBN 978-985-6441-25-0 (кн. 2)

ISBN 978-985-6441-23-6

© Физико-технический институт
Национальной академии
наук Беларуси, 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

В сборнике трудов (в 3-х книгах) анализируются результаты работ по трем основным научным направлениям, сформировавшимся в физико-техническом институте в течение 80 лет своего существования — физике прочности и пластичности, теоретическим и технологическим основам высокоэнергетического воздействия на материалы и покрытия, обработке металлов давлением.

Сборник трудов VI Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» состоит из 3-х книг:

Книга 1 — Конструкционные и функциональные материалы в современной технике, методы их получения. Материалы для микро- и нанoeлектроники.

Книга 2 — Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование инженерии поверхностей.

Книга 3 — Технологические процессы обработки металлов давлением, получения материалов с применением технологий литья. Пленарные доклады.

Первая книга содержит результаты исследований влияния высокоэнергетических и других физических воздействий на физико-механические свойства конструкционных и композиционных материалов и покрытий.

Рассматриваются свойства модифицированной керамики из диоксида циркония, керамики на основе $E23+Y2O3$, морфология нанотрубок из оксида титана, эффект импульсной фотохимической обработки при синтезе пленок SiC, комплекс свойств дисперсно-упрочненной меди, пленок карбонитрида кремния, синтетических минеральных сплавов, оптические характеристики гетеросистемы TiN/Ti/Si, эффект эволюции прочностных и коррозионных свойств микрокристаллических титановых сплавов; структура и триботехнические свойства биоактивных покрытий гидроксипатит — полимер и нанокompозитных углеродных покрытий на имплантатах, особенности диффузионного упрочнения высоколегированных сталей, характеристики Si-АПУ покрытий, структурные и фазовые превращения в тонкопленочных системах кремний-металл.

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ ЩЕТКАМИ

Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Беларусь

The development has been made of the method for describing the thermal processes that occur during grinding of planes by disk polymer-abrasive brushes. The expressions that take into account effect of tool and part thermophysical characteristics as well as kinematic parameters of processing are suggested for calculating the thermal state of a part to be processed and tool-surface contact zone.

Введение и постановка задачи

Разработка и реализация наукоемких ресурсосберегающих технологий является неотъемлемой частью научно-технического прогресса. В связи с этим возрастает роль исследования отделочно-зачистных методов механической обработки, в частности, обработки эластичным инструментом на основе полимерно-абразивных волоконных композиций. Метод характеризуется достаточно широкими технологическими возможностями, универсальностью и простотой реализации в условиях различных типов производств, возможностью автоматизации отделочно-зачистных операций, что обеспечивает значительный технический и социально-экономический эффект [1–3]. Одним из важнейших факторов, обеспечивающих производительность шлифования и формирование качества поверхностного слоя деталей, является температурный режим обработки, который существенным образом влияет на работоспособность, период стойкости и режущие свойства полимерно-абразивного инструмента. К настоящему времени проработан ряд научных аспектов рационального использования шлифования полимерно-абразивными щетками. Тем не менее, отсутствуют данные о тепловом взаимодействии контактирующих объектов при шлифования плоских поверхностей и методы количественной оценки тепловой напряженности процесса. В этой связи становится актуальной разработка метода аналитического расчета тепловых процессов, сопровожда-

ющих обработку плоских деталей полимерно-абразивным дисковым инструментом, с целью анализа основных температурных закономерностей, выбора рациональных параметров шлифования и повышения эффективности операций.

Результаты исследований и их анализ

Рассмотрим задачу, когда по поверхности плоской детали перемещается вращающаяся полимерно-абразивная щетка в форме диска, что соответствует одной из наиболее распространенных схем плоского шлифования [2]. В этом случае нагрев поверхности металла может быть аналитически исследован на основе решения классического дифференциального уравнения теплопроводности [4]. Предполагаем, что многочисленные очаги контакта волокон щетки с поверхностью представляют собой единый источник теплоты, действующий непрерывно и перемещающийся по поверхности детали с постоянной скоростью. Форма и размеры теплового источника определяются поверхностью зоны контакта щетки и детали.

Исследуем распределение температурного поля в детали прямоугольной формы, подвергающейся воздействию теплового источника конечных размеров, совершающего прямолинейное перемещение по ее поверхности. Нестационарное трехмерное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Граничные условия на торцевых и боковой поверхности детали при теплообмене с окружающей средой по закону Ньютона могут быть представлены уравнениями:

$$\lambda \frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x} = \alpha T(0, y, z, t), \quad \lambda \frac{\partial T(X_0, y, z, t)}{\partial x} = -\alpha T(X_0, y, z, t), \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial y} = \alpha T(x, 0, z, t), \quad \lambda \frac{\partial T(x, Y_0, z, t)}{\partial y} = -\alpha T(x, Y_0, z, t), \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} =$$

$$= \alpha T(x, y, 0, t) - Q \eta(b + Y_1 - y) \eta(y - Y_1) \eta(d + vt - x) \eta(x - vt), \quad (4)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (5)$$

где α , м²/с — температуропроводность детали, λ , Вт/(м·град) — теплопроводность детали, X_0 , м — длина детали, Y_0 , м — ширина детали, Z_0 , м — высота детали, Q — плотность теплового потока, b , м — ширина щетки, d , м — длина пятна контакта, Y_1 , м — расстояние от края детали до пятна контакта, v , м/с — продольная скорость перемещения, α , Вт/(м²·с) — коэффициент конвективного теплообмена на боковой и торцевых поверхностях, T , град — температура окружающей среды. Функция Хевисайда $\eta(x)$ определяется следующим образом:

$$\eta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Для решения системы (1)–(6) используем метод конечных интегральных преобразований Фурье по соответствующим координатам [4], который позволяет получить формулу для определения температурного поля в теле обрабатываемой детали в любой конкретный момент времени

$$T(x, y, z, t) = 32 \frac{aQ}{\lambda Z_0} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_k \frac{d}{2} (\mu_k \cos \gamma_k x + h X_0 \sin \gamma_k x)}{\mu_k^2 + h^2 X_0^2 + 2hX_0} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_n \frac{b}{2} \left(\cos \gamma_n \left(\frac{b}{2} + Y_1 \right) + \frac{h}{\gamma_n} \sin \gamma_n \left(\frac{b}{2} + Y_1 \right) \right) (\mu_n \cos \gamma_n y + h Y_0 \sin \gamma_n y)}{\mu_n^2 + h^2 Y_0^2 + 2hY_0} \times \\ \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(F_{kvm}^1(t) + F_{kvm}^2(t)) (\mu_m \cos \gamma_m z + h Z_0 \sin \gamma_m z)}{(a^2 (\gamma_{kvm}^2)^2 + \gamma_k^2 v^2) (\mu_m^2 + h^2 Z_0^2 + 2hZ_0)} \quad (7)$$

Коэффициенты в формуле (7) определяются следующим образом:

$$F_{kvm}^1(t) = a \gamma_{kvm}^2 \cos \gamma_k \left(\frac{d}{2} + vt \right) + \gamma_k v \sin \gamma_k \left(\frac{d}{2} + vt \right) - \\ - \left(a \gamma_{kvm}^2 \cos \gamma_k \frac{d}{2} + \gamma_k v \sin \gamma_k \frac{d}{2} \right) e^{-\sigma_{kvm}^1 t}, \quad (8)$$

$$F_{kvm}^2(t) = \frac{h}{\gamma_k} \left\{ a \gamma_{kvm}^2 \sin \gamma_k \left(\frac{d}{2} + vt \right) - \gamma_k v \cos \gamma_k \left(\frac{d}{2} + vt \right) - \right. \\ \left. - \left(a \gamma_{kvm}^2 \sin \gamma_k \frac{d}{2} - \gamma_k v \cos \gamma_k \frac{d}{2} \right) e^{-\sigma_{kvm}^2 t} \right\} \quad (9)$$

Величина теплового потока Q в области пятна контакта щетки с обрабатываемой деталью определяется с помощью соотношения

$$Q = \frac{P_s v_m \lambda}{l \varphi_k R (\lambda + \lambda_m)}, \quad (10)$$

где P_s , Н — сила резания, v_m , м/с — линейная скорость шлифования, λ_m , Вт/(м·град) — коэффициент теплопроводности материала щетки. Для определения коэффициента теплоотдачи обрабатываемую деталь можно рассматривать как прямоугольник, охлаждаемый по механизму вынужденной конвекции [5]. В этом случае величина α определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{k(T)}{Z} C Re^n Pr^{1/3}, \quad (11)$$

где $k(T)$, Вт/(м·град) — зависящий от температуры коэффициент теплопроводности окружающей среды (воздуха), Z , м — высота детали. величины Re и Pr — числа Рейнольдса и Прандтля, C и n — коэффициенты для различных интервалов значений Re .

Некоторые иллюстрации численного решения, выполненные по предложенной методике с помощью *DIGITAL Visual Fortran* и *Origin Professional*, представлены на рис. 1 и 2. Использовались следующие условия: $v_m = 10,5$ м/с; величина натяга (радиальной деформации) инструмента $\delta = 2$ мм; продольная подача $v = 0,005-0,03$ м/с, ширина образца $Y = 0,05$ м, длина образца $X = 0,2$ м, высота образца $Z = 0,02$ м, материал образца — сталь 45. Температура окружающего воздуха принята равной 20°C . Величина коэффициента теплоотдачи α определялась по методике, разработанной в [5]. Для условий рассматриваемого процесса коэффициент теплопроводности воздуха $k = 0,0279$ Вт/(м·град), а числа Рейнольдса и Прандтля соответственно приняты $Re = 515$ и $Pr = 0,71$. Величины коэффициента C и показателя степени n для данного значения числа Рейнольдса равны $C = 0,683$, $n = 0,466$. Подставляя приведенные результаты в уравнение (11) получим значение коэффициента теплоотдачи с поверхности плоской детали $\alpha \approx 6$ Вт/(м²·град)

На рис. 1 представлено распределение температурных полей по поверхности образца и в приповерхностном слое на глубине 3 мм, рассчитанных по приведенной методике, позволяющее оценить тепловое состояние зоны контакта, в частности, распределение температуры по пятну контакта и значения температурных градиентов в приповерхностном слое. Несовпадение области максимальных значений температуры поверхности образца с положением пятна контакта инструмента

обусловлено наличием движения подачи инструмента. С удалением от зоны контакта по длине и по ширине детали температура уменьшается и стремится к температуре окружающей среды. Максимальные значения температуры наблюдаются в зоне взаимодействия инструмента с поверхностью. Из рис. 1 следует, что при обработке без охлаждения тепловой поток из зоны контакта с инструментом преимущественно расходуется на нагрев образца.

Использование аналитического расчета по предлагаемой методике позволяет установить распределение тепла и значения градиентов температур для различных сечений рассматриваемого образца (рис. 2). Из представленной информации видно, что температурная составляющая обработки стали 45 при указанных режимах (максимальные значения температуры не превышают 220 °С) не оказывает существенного влияния на изменение структуры и физико-механических свойств приповерхностного слоя.

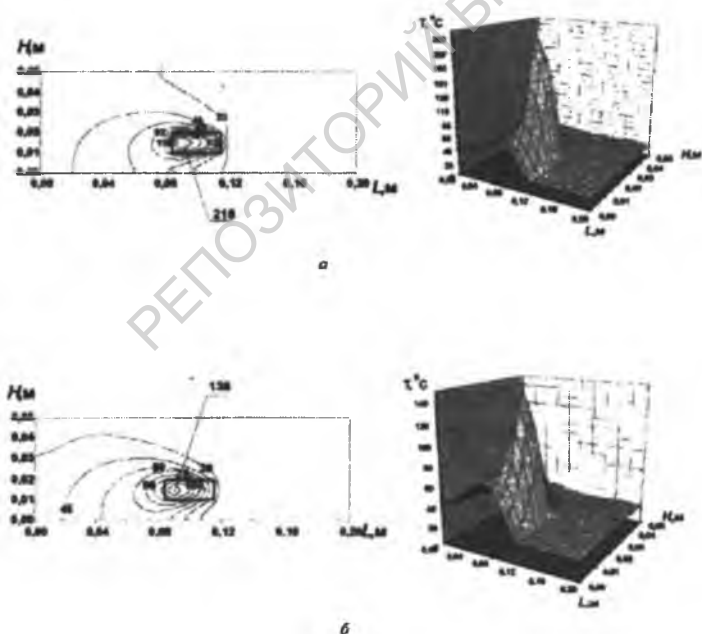


Рис. 1. Расчетные значения температуры $T, ^\circ\text{C}$ и их трехмерные изображения на поверхности образца из стали 45 (а) и на глубине 3 мм (б)

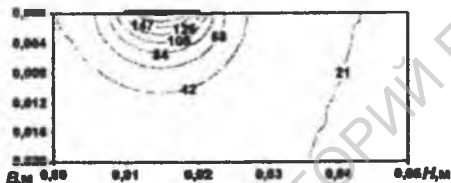
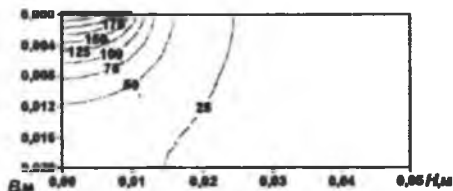


Рис. 2. Распределение расчетных значений температуры T °С в различных сечениях образца из стали 45: а — параллельно направлению подачи; б, в — перпендикулярно направлению подачи

ракурных градиентов, глубину теплового воздействия и оценить температурный режим обработки с целью обеспечения безопасных температур поверхности детали и подбора соответствующих параметров процесса. В дальнейшем планируется экспериментальная проверка расчетных данных, правомерности принятых допущений и граничных условий путем непосредственного измерения температур в процессе обработки деталей дисковыми полимерно-абразивными щетками.

Список использованных источников

1. Устинович, Д.Ф. Эластичный абразивный инструмент для отделочно-защитной обработки / Д.Ф. Устинович // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы II междунар. науч.-*

Заключение

В результате проведенных исследований была создана методика расчета теплового состояния плоских деталей при шлифовании дисковыми полимерно-абразивными щетками. Предложенная модель устанавливает взаимосвязь параметров обработки, теплофизических и геометрических характеристик инструмента и детали с изменением ее теплового состояния, что позволяет прогнозировать интенсивность тепловыделения, исследовать величины контактной температуры и темпе-

техн. конф.: Минск, 3–5 окт. 2007 г. / ГНУ «ФТИ НАНБ». — Минск, 2007. — С. 142–146.

2. Устинович, Д. Ф. Классификация методов обработки полимерно-абразивными волоконными композитами / Д. Ф. Устинович // *Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов междунар. науч.-техн. конф.: Севастополь, 13–17 сент. 2004 г.; в 4-х т. / ДонНТУ. — Донецк, 2004. — Т. 3. — С. 198–200.*

3. Устинович, Д. Ф. Отделочно-зачистная обработка листовых материалов эластичным инструментом с дискретным режущим контуром / Д. Ф. Устинович, В. И. Прибыльский // *Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов 16 междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 14–19 сент. 2009 г.; в 4-х т. / ДонНТУ. — Донецк, 2009. — Т. 3. — С. 176–179.*

4. Карташов, Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. — М.: Высшая школа, 2001. — 590 с.

5. Крейт, Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. — М.: Мир, 1983. — 512 с.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ