

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ОАО «БЕЛТРАНСГАЗ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

**V МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**(Минск, 15–17 сентября 2010 г.)**

**Сборник материалов**

**В 3 книгах**

**Книга 2**

**Высокоэнергетические технологии получения  
и обработки материалов.  
Технологии и оборудование инженерии поверхностей**

Минск  
ФТИ НАН Беларуси  
2010

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.В. Белый (зам. гл. ред.),  
В.М. Гришанович, Н.В. Райченок,  
Е.А. Маковец

Рецензенты:

д-р техн. наук, чл.-корр. Ф.И. Пантелеенко  
д-р техн. наук, чл.-корр. А.Ф. Ильющенко

С 56

**Современные методы и технологии создания и обработки материалов: V Меж-**  
**дунар. науч.-техн. коиф. (Минск, 15–17 септября 2010 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, 2010. – 290 с. : ил.**

ISBN 978-985-6441-19-9

Книга содержит доклады о результатах перспективных направлений развития электротермическо-  
го упрочнения сталей и сплавов, разработках различных схем скоростной электротермической обработки  
конструкционных сталей, упрочнении горячекатаной стали 20ХТР методами электротермии, моделиро-  
вании процесса резания при магнитно-абразивной обработке, снижении энергоемкости процесса плаз-  
менно-электромагнитного полирования, электронно-лучевой наплавки многофункциональных хромсо-  
держащих покрытий на стальную основу, особенностях формирования структуры электрохимических  
хромоалмазных покрытий, соединении технологий электронно-лучевой обработки для формирования  
покрытий на низкоуглеродистой стали, составе и структуре тонких пленок, полученных магнетронным  
распылением мозаичной мишени  $TiB_2+Ti$ , технологиях создания защитных покрытий с применением  
СВС-синтеза, механических и эксплуатационных свойствах покрытий на основе твердых растворов ни-  
трида титана, хрома и молибдена с включениями металла на режущий инструмент, циклической долго-  
вечности субмикроструктурного титана, обработанного интенсивными потоками ионов азота.

УДК [621.7+621.9](082)

ББК 30.61я.43

ISBN 978-985-6441-19-9 (кн. 2)

ISBN 978-985-6441-17-5

© Физико-технический институт  
Национальной академии наук Беларуси, 2010

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ ДИСКОВЫМИ ЩЕТКАМИ

ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»  
г. Минск, Республика Беларусь

*The calculation is made of thermal fields existing on grinding the cylindrical samples using disk polymer-abrasive brushes. The technique suggested makes it possible to assess the temperature processing conditions to ensure safe surface temperatures of part and tool as well as to select appropriate process parameters.*

### Введение и постановка задачи

Одной из тенденций развития отделочно-зачистной обработки является совершенствование метода шлифования-полирования инструментом на основе полимерно-абразивных волокон, образующих дискретный режущий контур. Наряду с известными достоинствами [1, 2] процесс характеризуется неравномерным тепловыделением в зоне контакта инструмент – поверхность при изменении геометрических характеристик волокна, свойств полимерного связующего и обрабатываемой поверхности, кинематических параметров и геометрии рабочей части инструмента. Формирование поверхностного слоя деталей осуществляется в условиях действия тепловых, динамических и абразивных процессов, оказывающих влияние на возникновение дефектов поверхности, а так же на работоспособность, период стойкости и режущие свойства полимерно-абразивного инструмента. Следует учитывать, что увеличение температуры в зоне резания до температуры плавления полиамида ПА-6 (220–250 °С) приводит к повышению износа композита вследствие истирания и термомеханической деструкции, намазыванию связки на обрабатываемую поверхность [3]. При этом переход от работоспособного состояния к потере режущих свойств может происходить в течение интервала времени, исключая фиксацию его визуальными методами в процессе выполнения операции. Это приводит к снижению производительности и качества обработки. Установление взаимосвязи между режимами шлифования и температурой в зоне обработки позволит определить параметры обработки, при которых температура режущей части инструмента не будет превышать критическую. На основе информации о распределении тепловых потоков, величины и характера температурных полей в инструменте и детали появляется возможность определять характер износа и разрушения полимерного связующего и обрабатывающего инструмента в целом, осуществлять рациональный выбор инструмента и методов охлаждения, оптимизировать процесс шлифования с целью минимизации теплового воздействия на поверхность изделия и рабочую поверхность инструмента. Поэтому актуальна задача аналитического расчета тепловых потоков, анализа температурных полей и теплового состояния цилиндрической детали, обеспечивающих возможность выбора рациональных параметров шлифования дисковыми полимерно-абразивными щетками.

### Результаты исследований и их анализ

Для решения этой задачи разработана физико-математическая модель нагрева поверхности цилиндрической детали под воздействием теплового источника конечных размеров, совершающего комбинированное перемещение по ее поверхности, на основе нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности [4]. С использованием конечных интегральных преобразований Фурье и Ханкеля получено выражение для определения температуры обрабатываемой детали в любой конкретный момент времени [5]:

$$T(z, r, f, t) = T_s + \frac{4aQ_R}{\pi \lambda R} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 h_L^2 L^2) \sin\left(\frac{\mu_k l}{2L}\right) \left( \mu_k \cos\left(\frac{\mu_k z}{L}\right) + h_0 L \sin\left(\frac{\mu_k z}{L}\right) \right)}{(\mu_k^2 + h_0^2 L^2) (h_L L + (\mu_k^2 h_L^2 L^2)) + h_0 L (\mu_k^2 h_L^2 L^2)} \times$$

$$\times \left[ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \Phi_k \frac{\mu_{0m}^2 (A_{k0m}(t) - B_{k0m} \exp(-a(\gamma_k^2 + \gamma_{0m}^2)t))}{(\mu_{0m}^2 + h_R^2 R^2) J_0(\mu_{0m}) \left( a^2 (\gamma_k^2 + \gamma_{0m}^2)^2 + \frac{\mu_k^2 v^2}{L^2} \right)} J_0\left(\frac{\mu_{0m} r}{R}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n\left(\frac{\mu_{nm} r}{R}\right) \frac{\sin\left(n \frac{\Phi_K}{2}\right)}{n} \times \right. \right.$$

$$\times \left. \frac{\mu_{nm}^2 \{ A_{knm}(t) \cos n(\varphi - \omega t) - B_{knm}(t) \sin n(\varphi - \omega t) - (A_{l0nm} \cos n\varphi - B_{knm} \sin n\varphi) \exp(-a(\gamma_k^2 + \gamma_{nm}^2)t) \}}{(\mu_{nm}^2 + h_R^2 R^2 - n^2) J_n(\mu_{nm}) \left\{ \left( a^2 (\gamma_k^2 + \gamma_{nm}^2)^2 - n^2 \omega^2 + \frac{\mu_k^2 v^2}{L^2} \right)^2 + 4n^2 \omega^2 a^2 (\gamma_k^2 + \gamma_{nm}^2)^2 \right\}} \right\}$$

Численные решения выполнялись с учетом следующих условий:  $v_{\text{ш}} = 3,4-18,3$  м/с; величина натяга (радиальной деформации) инструмента  $\delta = 1-4$  мм; частота вращения образца  $n = 2$  об/с, продольная подача  $S = 0,01$  м/с, диаметр образцов — 40 мм, длина  $z = 0,2$  м, материал — сталь 45, сталь 12X18H10T, сплав АМг5; температура окружающего воздуха — 20 °С. Визуализация результатов расчета осуществлялась с помощью пакетов *DIGITAL Visual Fortran* и *Orygin Professional*.

На рис. 1 приведено изменение температуры нагрева образца из стали 45 в зависимости от скорости резания при перемещении инструмента вдоль образующей, рассчитанное по приведенной методике через произвольно выбранный интервал времени  $t = 6$  с. Установлено, что характер изменения температурного поля при различных значениях скорости носит идентичный характер. Увеличение скорости резания  $V$  с 3,4 м/с до 18,3 м/с сопровождается возрастанием температуры нагрева поверхности с 53,6 до 198,2 °С, что связано с увеличением мощности теплового источника. Максимальные значения температуры наблюдаются в зоне взаимодействия инструмента с поверхностью. Температура поверхности после контакта уменьшается в 1,67–1,98 ( $V = 3,4$  м/с) и в 2,4–3,4 раза ( $V = 18,3$  м/с), не достигая исходной ( $T = 20$  °С).

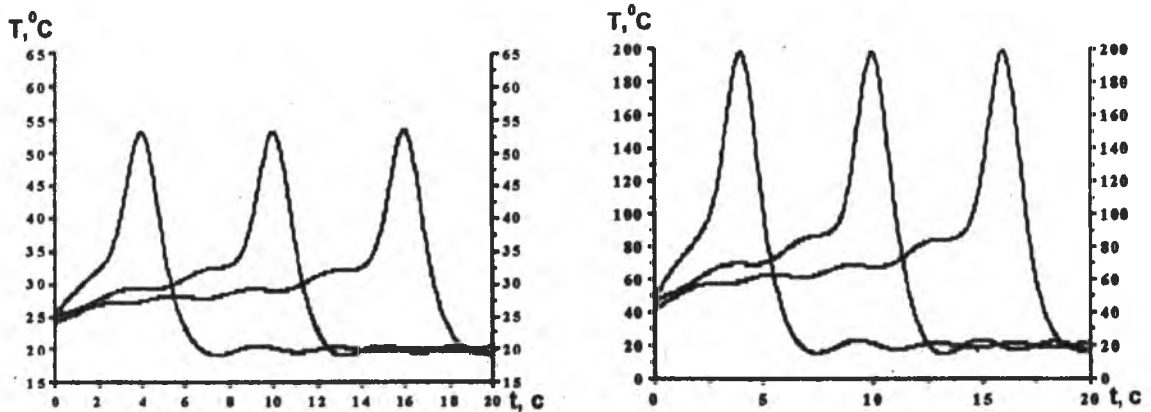


Рис. 1. Изменение температуры поверхности  $T$  °С образца через 4, 10, 16 секунд обработки:  
а —  $V = 3,4$  м/с; б —  $V = 18,3$  м/с

На рис. 2 показано влияние скорости резания в диапазоне  $V = 3,4\text{--}18,3$  м/с на изменение температуры поверхности образца из стали 45, при этом кривые носят однотипный характер. Это свидетельствует об увеличении сил резания, пластической деформации и трения, приводящих к интенсификации процессов теплообразования и возрастанию мощности теплового источника. Из сопоставления кривых видно, что максимум температуры при шлифовании дисковой щеткой наблюдается в области пятна контакта.

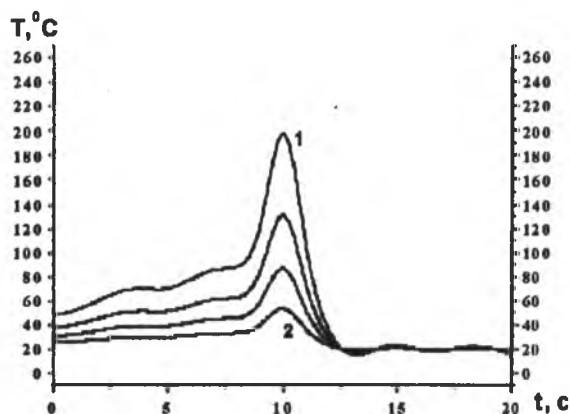


Рис. 2. Влияние скорости резания на температурное поле при  $t = 10$  с:  
1 —  $V = 18,3$  м/с; 2 —  $V = 3,4$  м/с

Результаты расчета температуры в зависимости от выбранной глубины приповерхностного слоя представлены на рис. 3. Анализ полученных данных позволяет оценить влияние теплонапряженности процесса шлифования на степень изменения микротвердости и глубину залегания технологических остаточных напряжений в приповерхностном слое. При шлифовании стали 12Х18Н10Т температура поверхностного слоя на 37 % превышает температуру нагрева алюминиевого сплава АМг5 (соответственно  $T = 132,4$  °С и  $T = 83,7$  °С), что объясняется различной теплопроводностью материалов. На глубине 5 мм наблюдается обратная картина — температура нагрева сплава АМг5 на 13 % превышает температуру нагрева стали 12Х18Н10Т (соответственно  $T = 54,1$  °С и  $T = 37,4$  °С).

Температура приповерхностного слоя, полученная аналитическим расчетом по предлагаемой методике, для упрощения анализа может быть представлена в графическом виде или в виде трехмерного температурного профиля (рис. 4). Подобная интерпретация позволяет установить распределение тепла и значения градиентов температур по сечению образца. Из представленной информации видно, что температурная составляющая обработки стали 45 при указанных режимах не оказывает существенного влияния на изменение структуры и физико-механические свойства приповерхностного слоя.

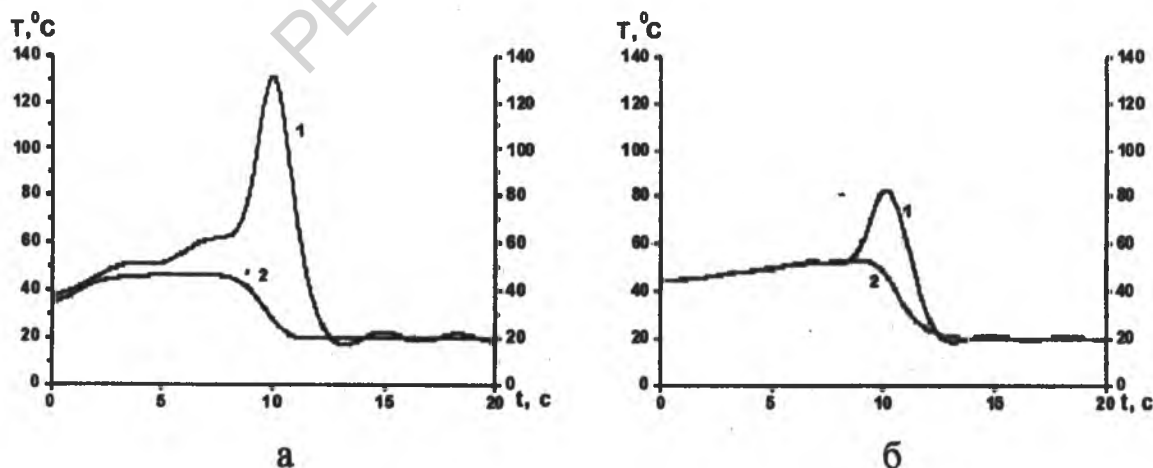
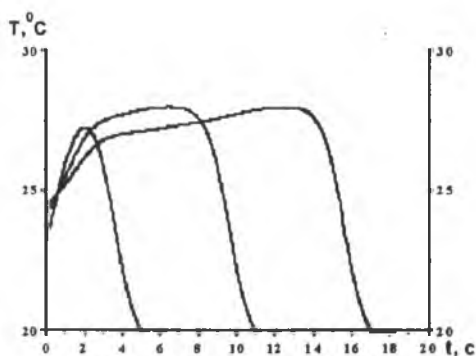
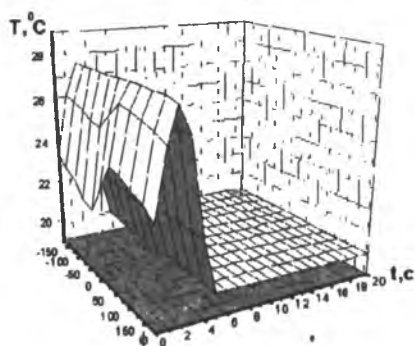


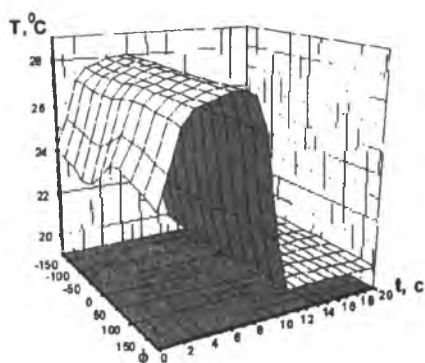
Рис. 3. Распределение температуры на поверхности (1) и на глубине 5 мм (2) при  $t = 10$  с;  $V = 11,4$  м/с;  $\delta = 2$  мм:  
а — сталь 12Х18Н10Т; б — сплав АМг5



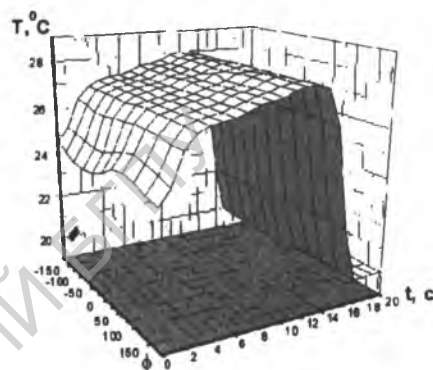
а



б

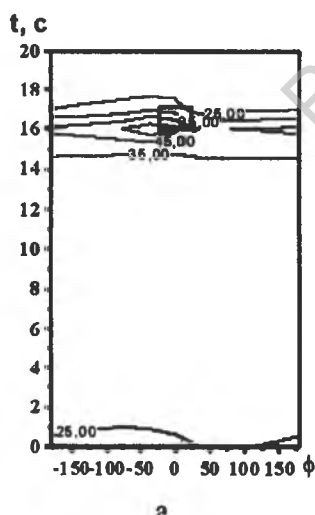


в

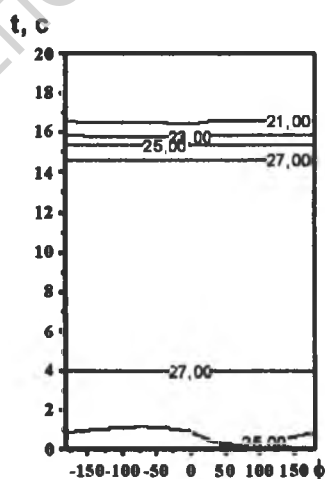


г

Рис. 4. График (а) и трехмерные изображения (б–г) изменения температуры поверхности  $T$  °C образца из стали 45 через 4, 10, 16 секунд обработки при  $V = 3,4$  м/с,  $\delta = 2$  мм



а



б

Рис. 5. Характер распределения температуры поверхности (а) и на глубине 5 мм (б)  $T$  °C образца из стали 45 при  $V = 3,4$  м/с,  $\delta = 2$  мм,  $t = 16$  с

На рис. 5 представлено распределение температурных полей по поверхности образца и в приповерхностном слое на глубине 5 мм, позволяющее оценить тепловое состояние зоны контакта, в частности, распределение температуры по дуге контакта. Несовпадение области максимальных значений температуры поверхности образца с положением пятна контакта инструмента обусловлено наличием относительных перемещений — подачи инструмента и движения вращения детали. Из рис. 5 следует, что при обработке без охлаждения тепловой поток из зоны контакта с инструментом преимущественно расходуется на нагрев образца.

## Заключение

Выполнен аналитический расчет тепловых полей при шлифовании цилиндрических образцов дисковыми полимерно-абразивными щетками. Предложенная методика позволяет оценить температурный режим обработки с целью обеспечения безопасных температур поверхности детали и инструмента и подбора соответствующих параметров процесса. Получены значения распределения температуры по поверхности и в приповерхностном слое образцов из различных материалов. Установлено, что скорость главного рабочего движения при обработке без охлаждения не должна превышать 18–20 м/с.

## Список использованных источников

1. Устинович, Д.Ф. Эластичный абразивный инструмент для отделочно-зачистной обработки / Д.Ф. Устинович // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы II междунар. науч.-техн. конф.*: Минск, 3–5 окт. 2007 г. / ГНУ «ФТИ НАНБ». — Минск, 2007. — С. 142–146.
2. 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.
3. Устинович, Д.Ф. Исследование износостойкости инструмента на основе полимерно-абразивных композитов / Д.Ф. Устинович // *Композиционные материалы в промышленности: Сб. трудов 29 междунар. науч.-техн. конф.*, Ялта, 1–5 июня. 2009 г. / УИЦ «Наука. Техника. Технология». — Киев, 2009. — С. 137–139.
4. Алифанов, А.В. Метод расчета температуры нагрева цилиндрической поверхности при обработке полимерно-абразивными щетками / А.В. Алифанов, Д.Ф. Устинович, В.М. Голуб // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. материалов 4 междунар. науч.-техн. конф.*, Минск, 19–21 окт. 2009 г. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2009. — Кн. 2. — С. 258–263.
5. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. — М.: Высшая школа, 2001. — 590 с.

УДК 669

А.Г. Анисович

## ВЛИЯНИЕ ФРАГМЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СПЛАВА АМГ1

ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»  
г. Минск, Республика Беларусь

*The thermal conductivity Al – 1 % Mg alloy has been investigated under plastic deformation followed by thermal cycling treatment in the temperature ranges 250–20 and 300–20 °C. It is shown that thermal conductivity changes associated with varying the micro- and substructure. It is established that formation of fragmented structure results in decrease of thermal conductivity.*