

УДК 621.923.9

Д.Ф. УСТИНОВИЧ, канд. техн. наук
Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск

В.М. ГОЛУБ
Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, г. Минск

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ВАЛОВ ДИСКОВЫМИ ЩЕТКАМИ

Исследованы расчетные значения величин контактной температуры, глубины теплового воздействия и оценен температурный режим обработки валов из конструкционных сталей 45, 12Х18Н10Т и 40Х13. Установлено влияние кинематических параметров процесса (скорости резания, частоты вращения детали) и теплофизических характеристик деталей на величину контактной температуры в зоне обработки и характер распределения температуры в приповерхностной зоне. Показано, что увеличение скорости резания и уменьшение частоты вращения детали способствует увеличению мощности теплового источника и значений контактной температуры. Установлено, что с целью обеспечения стабильности процесса шлифования и эксплуатационных характеристик инструмента скорость главного рабочего движения при обработке без охлаждения деталей типа «вал» не должна превышать 18–20 м/с.

Ключевые слова: шлифование, контактная температура, дисковая щетка, конструкционная сталь, тепловые режимы, режимы обработки

Введение. 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 процесс характеризуется неравномерным тепловыделением в зоне контакта «инструмент — поверхность» с изменением геометрических характеристик волокна, свойств полимерного связующего и обрабатываемой поверхности, кинематических параметров и геометрии рабочей части инструмента [1]. Формирование поверхностного слоя деталей осуществляется в условиях действия тепловых, динамических и абразивных процессов, оказывающих влияние на возникновение дефектов поверхности, а также на работоспособность, период стойкости и режущие свойства полимерно-абразивного инструмента. Следует учитывать, что увеличение температуры в зоне резания до температуры плавления полиамида ПА-6 (240—250 °С) приводит к повышению износа композита вследствие истирания и термомеханической деструкции и намазыванию связки на обрабатываемую поверхность [2]. При этом переход от работоспособного состояния к потере режущих свойств может происходить в течение интервала времени, исключаящего его фиксацию визуальными методами в процессе выполнения операции. Это приводит к снижению про-

изводительности 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 обрабатываемого 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.

В работе была поставлена задача исследовать методом аналитического моделирования тепловые режимы обработки деталей типа «вал» дисковыми полимерно-абразивными щетками и изучить их основные закономерности.

Результаты исследований. Исследовалась традиционная схема круглого наружного шлифования вала, при которой по его поверхности вдоль оси перемещается вра-

шающаяся полимерно-абразивная щетка в форме диска, сам вал в это время совершает вращательное движение. При моделировании тепловых режимов валов использовались подходы, изложенные в работе [3].

Численные решения выполнялись с учетом следующих условий: скорость резания $V=3,4-18,3$ м/с; величина натяга (радиальной деформации) инструмента $\delta=2$ мм; частота вращения вала $n=1-5$ об/с, продольная подача $S_n=0,01$ м/с, диаметр вала — 40 мм, длина $z=0,2$ м, материал — сталь 45, сталь 12X18H10T, сталь 40X13. Температура окружающего воздуха принята равной 20 °С, коэффициент теплопроводности воздуха $k=0,0279$ Вт/(м·град), числа Рейнольдса и Прандтля соответственно приняты $Re=515$ и $Pr=0,71$, коэффициент теплоотдачи с поверхности вращающегося вала $\alpha \approx 6$ Вт/(м²·град). Визуализация результатов расчета осуществлялась с помощью пакетов *DIGITAL Visual Fortran* и *Orygin Professional*.

Количество тепла, переходящее в деталь, существенно зависит от материала образца (рисунок 1). Наибольшие значения температуры поверхности зафиксированы у сталей 12X18H10T и 40X13 (соответственно $T=132,4$ °С и $T=114,6$ °С). При шлифовании стали 45 в деталь переходит значительно большее количество теплоты, чем у отмеченных сталей, что объясняется различными коэффициентами теплопроводности, и ока-

зывает влияние на величину контактной температуры. Наибольшие значения температуры нагрева приповерхностного слоя на глубине 5 мм получены для сталей 12X18H10T и 40X13 (соответственно $T = 46,7$ °С и $T = 47,3$ °С), наименьшие — для стали 45 ($T = 44,8$ °С). Полученные результаты свидетельствуют о неравномерном распределении температур на обрабатываемой поверхности и в приповерхностном слое и о различных значениях температурных градиентов для каждого исследуемого материала. Перемещение теплового источника по холодной поверхности вала с $T = 20$ °С сопровождается резким повышением температуры до максимума в зоне контакта с инструментом и последующим охлаждением с несколько меньшей интенсивностью (см. рисунок 1 а). На глубине 5 мм от поверхности скорость охлаждения изменяется незначительно — с 0,48 град/с (сталь 12X18H10T) до 0,7 град/с (сталь 40X13) (см. рисунок 1 б). Предлагаемый метод позволяет проанализировать распределение температуры по сечению обрабатываемой детали в любой момент времени и построить изотермы температурных полей и градиентов температур с целью анализа возможных структурных превращений и расчета величин остаточных напряжений.

На рисунке 2 приведено распределение температуры на поверхности образцов при обработке со скоростью резания в диапазоне $V=3,4-18,3$ м/с. Анализ результатов показывает, что ужесточение режимов обработки сопровождается ростом значений температуры. Это свидетельствует о возрастании мощности теплового источника вследствие увеличения сил резания, пластической деформации и трения, приводящих к интенсификации процессов теплообразования. Возрастает длина пути резания—трения и общее количество тепловых импульсов, создаваемых торцами волокон инструмента в единицу времени. Из сопоставления кривых видно, что максимум температуры при шлифовании дисковой щеткой наблюдается в области пятна контакта. Полученные данные позволяют осуществить выбор предельных значений скорости резания при обработке без охлаждения, которые для сталей не должны превышать 18—20 м/с.

Результаты расчета температуры на поверхности и с шагом 1 мм от поверхности шлифования представлены на рисунке 3. Анализ полученных данных позволяет оценить влияние теплонапряженности процесса шлифования на степень изменения микротвердости, глубину залегания технологических остаточных напряжений и возможность протекания структурных и фазовых превращений в приповерхностном слое. Наблюдается неравномерное распределение температур на поверхности и по сечению образца, при этом величина градиента температур зависит от обрабатываемого материала. Температура поверхности стали 12X18H10T отличается от температуры на глубине 5 мм в 3,26 раза, стали 45 — в 1,87 раза. При шлифовании стали 12X18H10T температура поверхностного слоя в 1,63 раза превышает температуру нагрева стали 45 (соответственно $T=198,2$ °С и $T=131,5$ °С), что объясняется различиями в теплопроводности и механических свойствах материалов. На глубине 5 мм наблюдается обратная картина — температура нагрева стали 45 на 13,8 % превышает температуру нагрева стали 12X18H10T (соответственно $T=70,4$ °С и $T=60,7$ °С), что связано с различиями в теплопроводности обрабатываемых материалов. Анализ рисунка 3

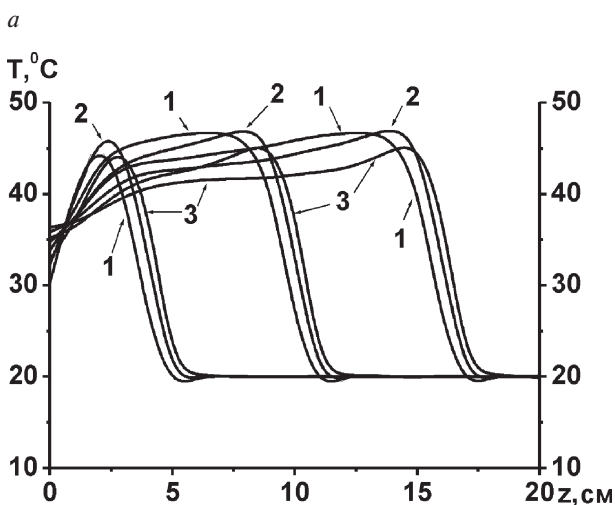
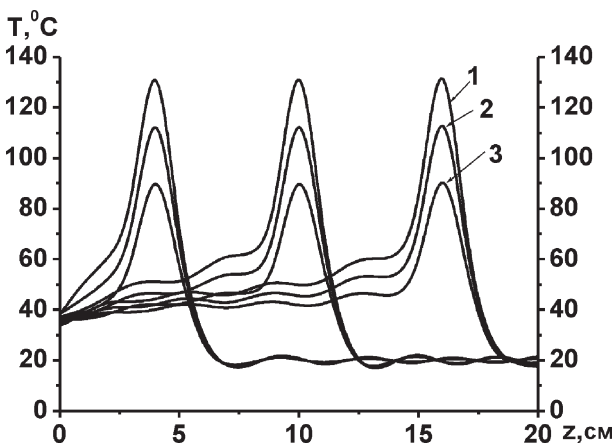
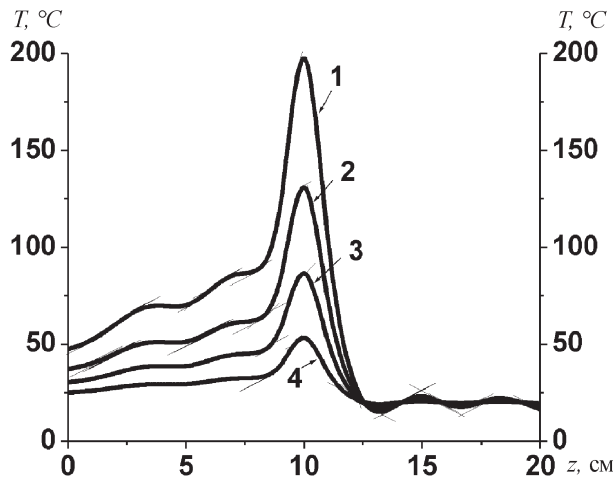
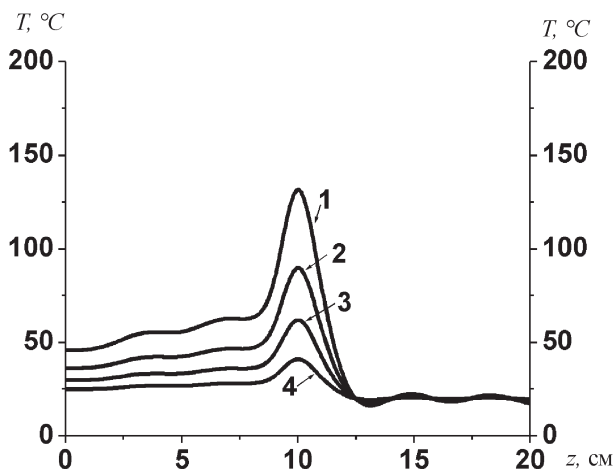


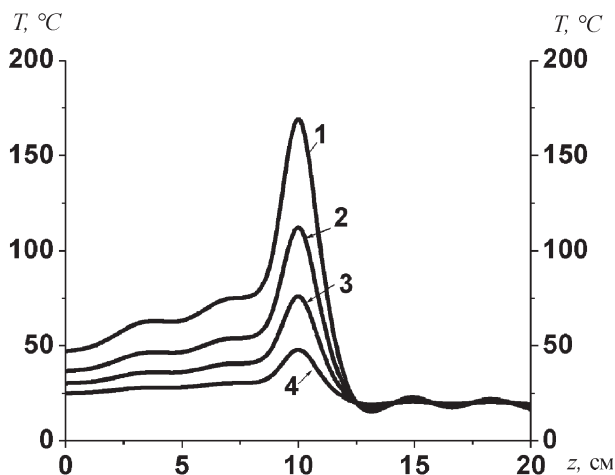
Рисунок 1 — Характер распределения температуры T , °С на поверхности (а) и на глубине 5 мм (б) образцов при $V=11,4$ м/с, $\delta=2$ мм, $n=2$ об/с; $t=4; 10; 16$ с: 1—12X18H10T, 2—40X13, 3—сталь 45



a



б



в

Рисунок 2 — Влияние скорости резания на температурное поле поверхности образцов при $V=18,3$ м/с (1), $V=11,4$ м/с (2), $V=6,8$ м/с (3), $V=3,4$ м/с (4), $n=2$ об/с; $t=10$ с: а — сталь 12X18H10T; б — сталь 45, в — сталь 40X13

показывает, что скорость взаимного перемещения детали и инструмента оказывает существенное влияние на распределение тепла в приповерхностной области. С увеличением глубины максимум температуры смеща-

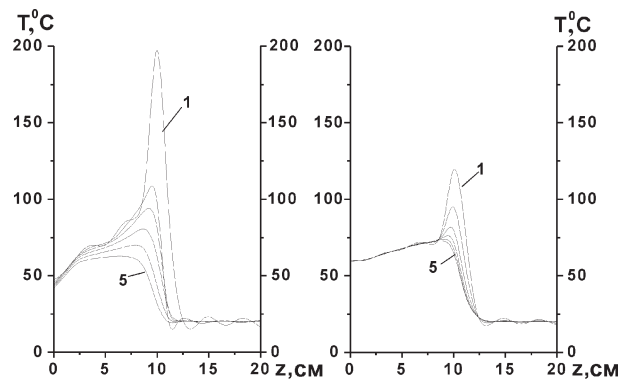
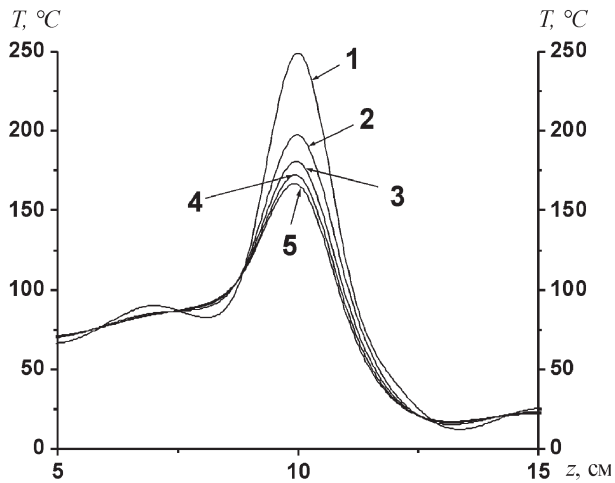


Рисунок 3 — Расчетные значения температурных полей в детали на поверхности (1) и на глубине 5 мм (5) при $t=10$ с; $V=18,3$ м/с; $\delta=2$ мм; $n=2$ об/с: а — сталь 12X18H10T; б — сталь 45

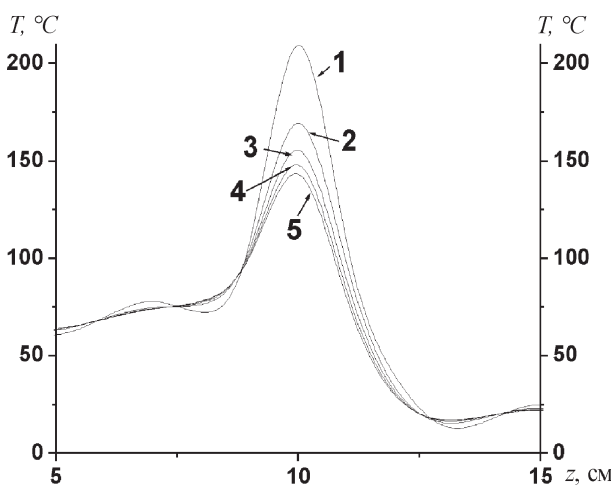
ется в сторону, противоположную направлению перемещения теплового источника (направлению подачи).

Влияние частоты вращения деталей в диапазоне $n=1-5$ об/с на величину температуры поверхности представлено на рисунке 4. Анализ расчетных зависимостей свидетельствует о снижении контактной температуры с ростом частоты вращения детали, обуславливающей уменьшение времени теплового воздействия источника. Максимальные значения температуры зафиксированы в зоне контакта инструмента с поверхностью детали. С удалением от зоны контакта по оси детали температура в расчетных точках уменьшается. Возрастает скорость взаимодействия холодных участков детали ($T=20$ °С) с тепловым источником, уменьшается время действия теплового источника, что приводит к снижению контактных температур. Как показали проведенные исследования, эксплуатация полимерно-абразивного инструмента без охлаждения при обработке стали 12X18H10T невозможна при частоте вращения $n=1$, поскольку контактная температура превышает температуру плавления полимерного связующего ($T=240$ °С). При шлифовании с $n=1$ об/с контактная температура достигает $T=251,4$ °С, увеличение скорости вращения детали в 5 раз приводит к снижению значений температуры в 1,51 раза ($T=166,3$ °С). Наиболее высокие значения температуры характерны для стали 12X18H10T. При шлифовании стали 40X13 температура находится в интервале $T=218,6-142,7$ °С, стали 45 — соответственно $T=160,3-111,8$ °С.

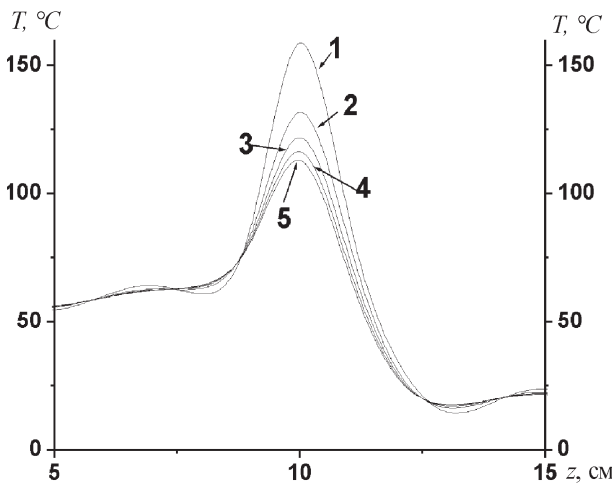
Влияние частоты вращения детали из стали 12X18H10T в диапазоне $n=1-5$ об/с на величину температуры при отсутствии движения продольной подачи (случай врезного шлифования, $S_n=0$) представлено на рисунке 5. Анализ графиков показал, что с уменьшением частоты вращения n , характеризующей окружную скорость вращения детали, время действия теплового источника на поверхность увеличивается, что приводит к росту контактной температуры для всех исследуемых материалов — с $T=162,1$ °С до $T=171,6$ °С (сталь 12X18H10T), с $T=146,3$ °С до $T=154,2$ °С (сталь 40X13), с $T=126,6$ °С до $T=132,1$ °С (сталь 45). При этом уменьшается скорость охлаждения поверхности, о чем свидетельствует уменьшение интервалов между экстремумами кривых для всех материалов — $\Delta T=9,6$ °С при $n=5$ об/с и $\Delta T=24,4$ °С при $n=1$ об/с (сталь 12X18H10T), для стали 45 — соответственно $\Delta T=7,1$ °С



a



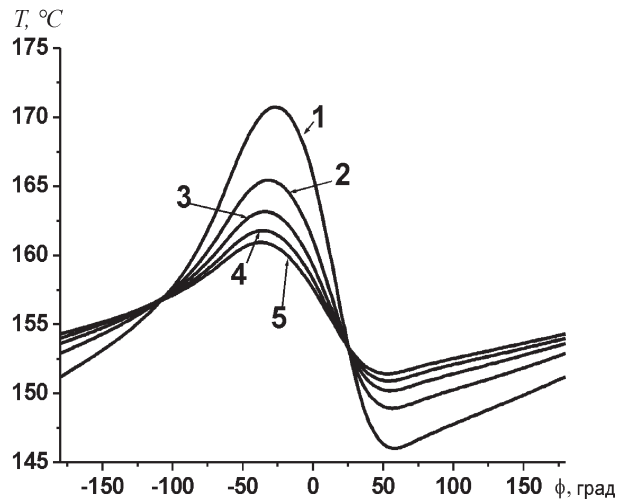
б



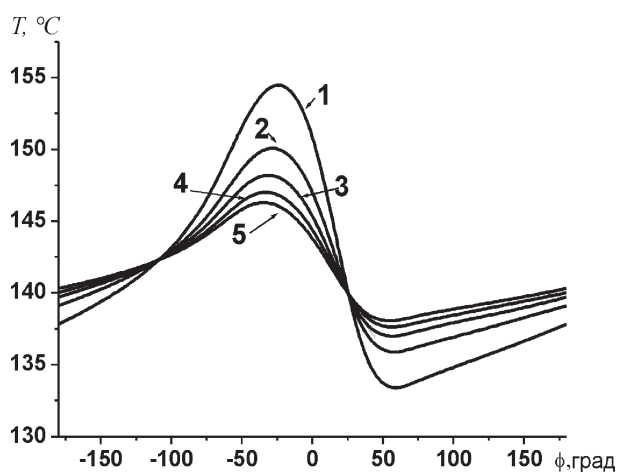
в

Рисунок 4 — Расчетные значения температуры нагрева поверхности в зависимости от частоты вращения детали при $t = 10$ с; $V = 18,3$ м/с; $n = 0,01$ м/с, $\delta = 2$ мм: а — сталь 12X18H10T, б — сталь 40X13, в — сталь 45: 1 — $n = 1$ об/с, 2 — $n = 2$ об/с, 3 — $n = 3$ об/с, 4 — $n = 4$ об/с, 5 — $n = 5$ об/с

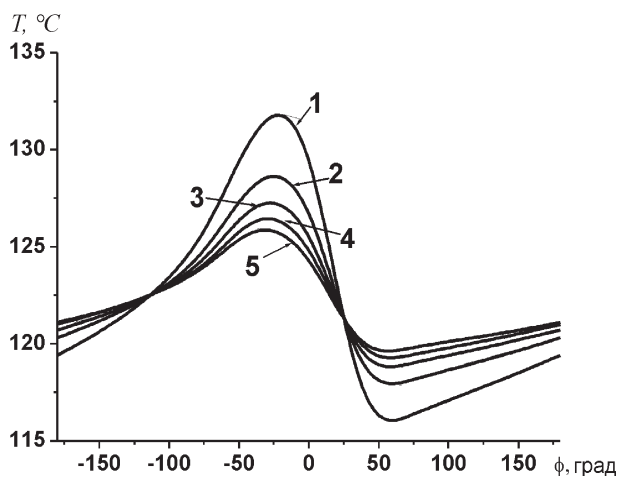
и $\Delta T_1 = 15,4$ °С. Приближение к зоне контакта по окружности приводит к увеличению температуры, которая достигает максимума в зоне контакта и затем снижается с меньшей интенсивностью. С ростом n ин-



a



б



в

Рисунок 5 — Расчетные значения температуры нагрева поверхности в зависимости от частоты вращения детали при $t = 20$ с; $V = 2,3$ м/с; $\delta = 2$ мм: а — сталь 12X18H10T, б — сталь 40X13, в — сталь 45: 1 — $n = 1$ об/с, 2 — $n = 2$ об/с, 3 — $n = 3$ об/с, 4 — $n = 4$ об/с, 5 — $n = 5$ об/с

тенсивность обработки возрастает, при этом одновременно уменьшается время контакта каждой точки шлифуемой поверхности вала с источником теплоты, что вызывает снижение температуры.

Заключение. Изучение влияния параметров теплового источника на тепловые явления при шлифовании валов полимерно-абразивными щетками позволяет осуществлять выбор технологических параметров обработки с учетом производительности процесса, стойкости инструмента и качества обрабатываемой поверхности. С помощью аналитического расчета исследованы величина контактной температуры, глубина теплового воздействия и оценен температурный режим обработки с целью обеспечения безопасных температур поверхности детали и инструмента. Установлена связь между контактной температурой в зоне обработки, теплофизическими характеристиками образцов и кинематикой процесса. Получены значения распределения температуры по поверхности и в приповерхностном слое образцов из сталей 12X18H10T, 45 и 40X13. Исследованиями установлено, что увеличение скорости резания и уменьшение частоты вращения детали способствует увеличению мощности теплового источника и значений контактной температуры. Установлено, что для обеспечения стабильности процесса шлифования и эксплуатационных характеристик инструмента скорость главного рабочего движения при обработке без охлаждения деталей типа «вал» не должна превышать 18–20 м/с.

Обозначения

T , °C — температура детали;
 V , м/с — скорость резания;
 t , с — время обработки;

δ , мм — величина натяга (радиальной деформации) инструмента;

S_n , м/с — величина продольной подачи инструмента;

n , об/с — частота вращения детали;

z , м — длина детали;

k , Вт/(м·град) — коэффициент теплопроводности воздуха;

α , Вт/(м²·град) — коэффициент конвективного теплообмена.

Список литературы

1. 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. тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 14–19 сент. 2009 г.: в 4 т. — Донецк: ДонНТУ, 2009. — Т. 3. — С. 176–179.
2. Устинович, Д.Ф. Исследование износостойкости инструмента на основе полимерно-абразивных композитов / Д.Ф. Устинович // Композиц. материалы в пром-ти: сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., Ялта, 1–5 июня 2009 г. — Киев: Наука. Техника. Технология, 2009. — С. 137–139.
3. Алифанов, А.В. Метод расчета температуры нагрева цилиндрической поверхности при обработке полимерно-абразивными щетками / А.В. Алифанов, Д.Ф. Устинович, В.М. Голуб // Совр. методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов VI 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.
4. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. — М.: Высш. шк., 2001. — 590 с.

Ustsinovich D.F., Golub V.M.

Control of thermal conditions on grinding of shafts by disk brushes

The investigation has been made of the calculated values of contact temperature magnitudes, depth of thermal effect and the temperature conditions required for processing of shafts made of the 45, 12X18H10T and 40X13 constructional steels have been evaluated. It is established that the kinematic process parameters (cutting speed and frequency of a part rotation) and thermophysical characteristics of a part affect the value of a contact temperature in a processing zone as well as the nature of temperature of subsurface region. The increase in a cutting speed and decrease in frequency of a part rotation are shown to contribute to enhancing the power of a thermal source and values of a contact temperature. It is found that in order to ensure stable process of cutting and operating characteristics of a tool its cutting speed should not exceed 18 to 20 m/s when processing parts of a shaft type without cooling.

Поступила в редакцию 21.02.2011.