

УДК 621.923.9

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

В.И. ПРИБЫЛЬСКИЙ, канд. техн. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ ДИСКОВЫМИ ЩЕТКАМИ

Приведены результаты исследований затрат мощности, необходимой для осуществления процесса обработки полимерно-абразивными дисковыми щетками деталей из конструкционных сталей 45 и 12Х18Н10Т. Выявлено, что на изменение мощности обработки существенное влияние оказывают увеличение скорости резания, зернистости порошка абразивного модификатора волокна, радиальной деформации инструмента, вид обрабатываемого материала и применение СОЖ. Показано, что увеличение скорости резания, зернистости и радиальной деформации инструмента способствует росту мощности обработки. Получены эмпирические зависимости, позволяющие аналитически определять значения мощности и ее составляющих в зависимости от технологических параметров процесса.

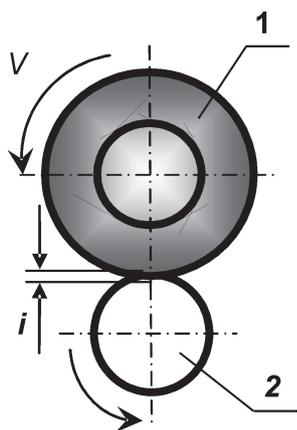
Ключевые слова: мощность, шлифование, дисковая щетка, полимерно-абразивное волокно

Введение. Технологии обработки инструментом на основе полимерно-абразивных волоконных композитов обеспечивают повышение производительности операций полирования, зачистки, снятия заусенцев, скругления острых кромок, позволяют заменить экологически вредные технологии химической и электрохимической обработки, повысить эксплуатационные характеристики деталей [1, 2]. Мощность шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками является численной характеристикой энергии, затрачиваемой на резание и пластическое деформирование обрабатываемой поверхности и стружки, формирование геометрических параметров шероховатости поверхности и ее физико-механических свойств. От величины мощности обработки зависят динамические особенности процесса, силы резания, величина давления инструмента на обрабатываемую поверхность, характер стружкообразования, что в конечном итоге определяет интенсивность съема металла и качество поверхностного слоя детали. Величина активной мощности, потребляемой приводом главного движения, используется в качестве контролируемого параметра при построении адаптивных систем управления металлорежущих станков [3]. Данные о мощности необходимы для управления процессом шлифования, автоматизации технологического процесса, для разработки оборудования и выбора режимов обработки [4].

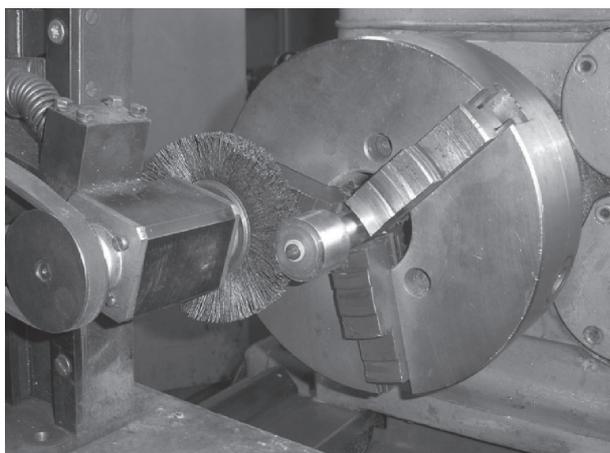
Цель работы. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния технологических параметров процесса обработки полимерно-абразивными дисковыми щетками на величину мощности процесса.

Методика исследований. Мощность, необходимая для осуществления вращения полимерно-абразивной дисковой щетки в процессе обработки, равна активной мощности, потребляемой приво-

дом главного движения, и определяется выражением $N = N_{xx} + N_{ш}$, где N_{xx} , кВт — мощность холостого хода; $N_{ш}$, кВт — мощность шлифования. Мощность $N_{ш}$ расходуется на преодоление сил резания, трения, упругого и пластического деформирования обрабатываемой поверхности, обусловленных взаимодействием инструмента с обрабатываемой деталью. Исследование мощности производилось для традиционной схемы круглого наружного шлифования (рисунок 1 а). Экспериментальная установка была реализована на базе токарно-винторезного станка мод. 16К20, на суппорте которого устанавливался обрабатывающий модуль с приводом вращения инструмента (см. рисунок 1 б). В цепь питания электродвигателя модуля был подключен измерительный комплект К505, содержащий ваттметр, вольтметр и амперметр класса точности 02, позволяющий измерять мощность в трехфазных четырехпроводных цепях переменного тока. Технические характеристики установки обеспечивали изменение технологических параметров эксперимента в следующих диапазонах: частоты вращения инструмента — 1300, 2100, 4100 об/мин; частоты вращения детали — 12—1600 об/мин; величины натяга инструмента — 1—10 мм. Изменение частоты вращения инструмента осуществляли ступенчатым способом при помощи сменных шкивов, детали — при помощи исполнительных механизмов станка. Материал обрабатываемой детали — сталь 45 ГОСТ 1050-88 твердостью НВ 192—196 и сталь 12Х18Н10 ГОСТ 5949-75 твердостью НВ 236—265. В качестве инструмента использовали дисковые щетки из полимерно-абразивного волокна диаметром 125 мм, шириной 11 мм, с величиной вылета ворса 25 мм, материал полимерной матрицы — полиамид ПА-6 [5]. В качестве абразивного модификатора волокна применялся элек-



а



б

Рисунок 1 – Схема обработки *а* и рабочая зона экспериментальной установки *б*

трокорунд белый зернистостью $\Delta = 60; 120; 160; 320$ мкм, концентрация которого составляла 24–32 %. Остальные технологические параметры выбирались следующими: смазывающе-охлаждающая жидкость — водный раствор эмульсола «Синма-2» 3 % концентрации; шероховатость поверхности деталей $Ra = 0,62–0,87$ мкм. Время обработки составляло 15 с. Частоту вращения детали задавали равной 20 об/мин. Обрабатываемую деталь закрепляли на оправке, устанавливаемой в патроне станка.

Был реализован следующий порядок проведения опытов. На первом этапе производили пуск электродвигателя модуля и фиксировали значения мощности холостого хода N_{xx} . После этого инструмент устанавливали с необходимым натягом (радиальной деформацией) относительно обрабатываемой детали и снимали показания суммарной потребляемой мощности N при установленном режиме работы. В каждом опыте производили не менее пяти измерений мощности и определяли ее среднее арифметическое значение. Как показал эксперимент, колебания значений мощности в процессе обработки составляли 0,2–1,5 %.

Результаты и их анализ. Результаты исследований представлены на рисунках 2–4. Анализ полученных результатов показывает, что для рассматриваемого метода обработки цилиндрических деталей на рост мощности обработки $N_{ш}$ оказывает влияние изменение скорости резания, зернистости порошка абразивного модификатора волокна, величина натяга инструмента, применение смазывающе-охлаждающей жидкости и марка обрабатываемого материала. С ростом скорости резания значения мощности увеличиваются для всего исследованного диапазона скорости резания, значений зернистости и величин натяга инструмента. Анализ графиков показывает, что зависимости имеют одноподобный характер, количественные показатели которых определяются различием технологических параметров обработки и характеристик инструмента. При увеличении скорости резания в 3,15 раза (с 8,5 м/с до 26,8 м/с) при обработке стали 45 мощность шлифования $N_{ш}$ возрастает в 3,68 раза ($\Delta = 320$ мкм, $i = 2$ мм) и в 4,2 раза ($\Delta = 120$ мкм, $i = 2$ мм), при обработке с натягом $i = 4$ мм — в 3,37 раза ($\Delta = 320$ мкм) и в 3,65 раза ($\Delta = 120$ мкм; рисунок 2 а, в). Это объясняется увеличением сил резания, общего количества контактов рабочей части инструмента с поверхностью и длины пути абразивных зерен в единицу времени, возрастанием интенсивности абразивного и фрикционного взаимодействия. Известно, что с увеличением рабочей скорости изменяется сопротивление металла пластическому деформированию, резанию и трению, зафиксированное при исследовании процесса шлифования [6]. Вследствие этого увеличивается количество абразивных зерен, осуществляющих резание, появляется возможность микрорезания абразивными зернами с достаточно большими радиусами закругления режущих кромок ($\rho = 60–110$ мкм). Результаты исследования, приведенные на рисунке 2 в, свидетельствуют, что при увеличении скорости шлифования возрастает количество стружек, снимаемых в единицу времени, увеличивается количество зерен, производящих снятие стружки и соответственно уменьшается количество зерен, производящих упругое и пластическое деформирование. Тем самым обеспечивается диспергирование снимаемого слоя металла на более мелкие элементы, чем при обычных (до 10 м/с) скоростях обработки. Это приводит к росту затрат мощности $N_{ш}$ на диспергирование снимаемого объема металла. Выражения для расхода мощности N (рисунок 4) при обработке с натягом $i = 2$ мм имеют вид (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,996–0,998$):

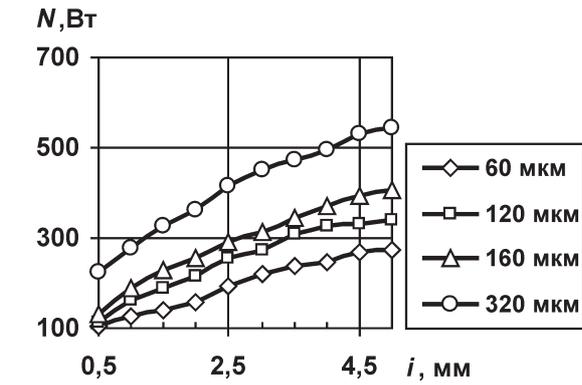
$$N_{xx} = 0,5219V^2 - 8,7383V + 518,1; \quad (1)$$

$$N_1 = 2,1205V^2 - 34,464V + 783,37; \quad (2)$$

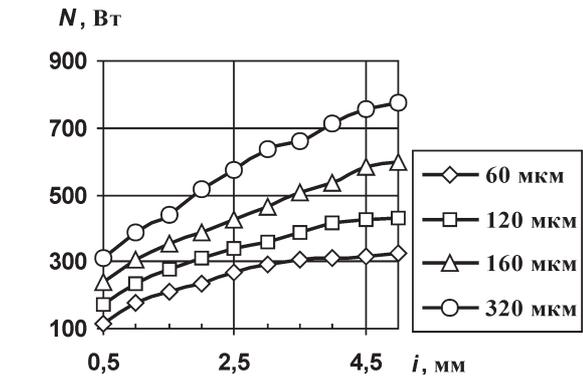
$$N_2 = 2,4158V^2 - 39,333V + 870,26; \quad (3)$$

$$N_3 = 2,8587V^2 - 42,739V + 905,61; \quad (4)$$

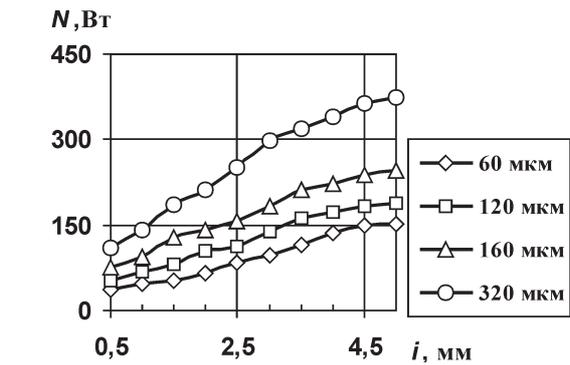
$$N_4 = 2,7532V^2 - 35,062V + 953,53; \quad (5)$$



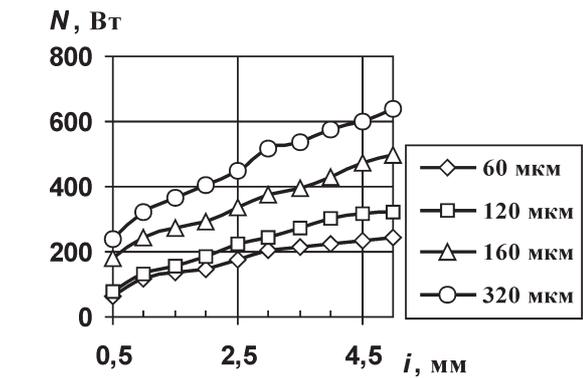
a



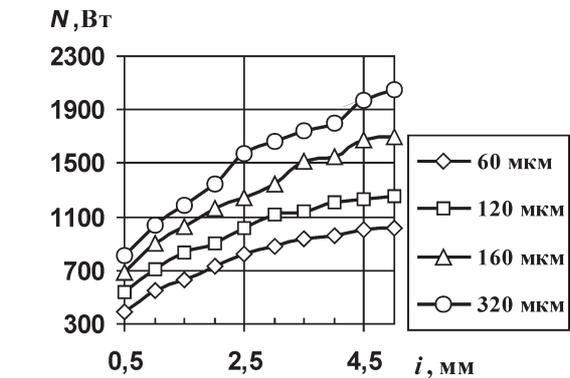
a



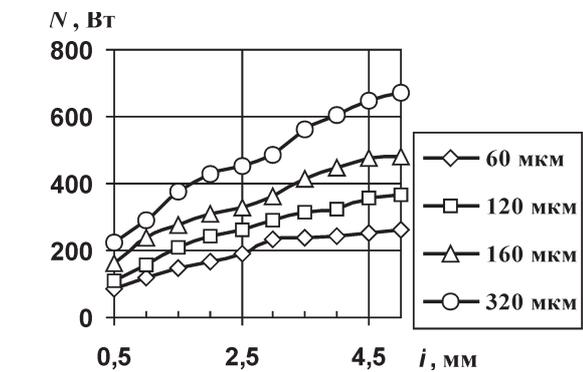
б



б



в

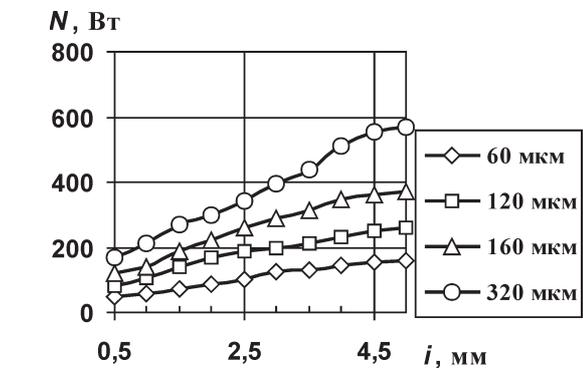


в

Рисунок 2 – Зависимость мощности шлифования $N_{\text{ш}}$ стали 45 от натяга инструмента i : а – $V=8,5$ м/с, обработка всухую; б – $V=8,5$ м/с, обработка с СОЖ; в – $V=26,8$ м/с, обработка всухую

где $N_{\text{хх}}$, кВт — мощность холостого хода; N_1 – N_4 , кВт — мощность шлифования при обработке инструментом с зернистостью абразивного модификатора соответственно $\Delta = 60; 120; 160; 320$ мкм.

Аналогичные результаты наблюдаются и при шлифовании в присутствии СОЖ (см. рисунок 2 б и рисунок 3 б, в). При увеличении скорости резания в 1,61 раза (с 8,5 м/с до 13,7 м/с) при обработке стали 45 мощность шлифования $N_{\text{ш}}$ возрастает в 1,96 раза ($\Delta = 320$ мкм, $i = 1,5$ мм) и в 2,56 раза ($\Delta = 60$ мкм, $i = 1,5$ мм), при обработке с величиной натяга $i = 3$ мм — в 1,8 раза ($\Delta = 320$ мкм) и в 2,22 раза ($\Delta = 120$ мкм). Уменьшение значений



а

Рисунок 3 – Зависимость мощности шлифования $N_{\text{ш}}$ от натяга инструмента i при $V=13,7$ м/с: а – сталь 45, обработка всухую; б – сталь 45, обработка с СОЖ; в – сталь 12Х18Н10Т, обработка всухую; г – сталь 12Х18Н10Т, обработка с СОЖ

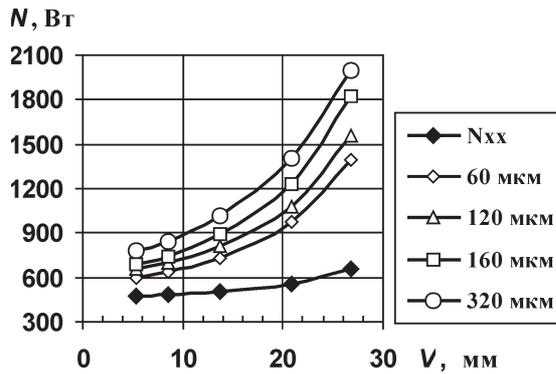


Рисунок 4 — Зависимость мощности N от скорости резания V при шлифовании стали 45 инструментом различной зернистости

$N_{\text{ш}}$ по сравнению с обработкой всухую объясняется снижением сил граничного трения между рабочей поверхностью инструмента и обрабатываемой поверхностью, облегчением процессов деформации и разрушения металла поверхности, удалением продуктов взаимодействия вследствие охлаждающего, смазывающего, поверхностно-активного, моющего и эмульгирующего действия СОЖ. Смазывающее действие СОЖ проявляется в уменьшении работы трения, предотвращении затупления и износа абразивных зерен, защите рабочих поверхностей волокон от адгезии и снижении проявлений диффузии. Поверхностно-активное действие СОЖ изменяет механизм стружкообразования, оказывает предразрушающее воздействие на обрабатываемую поверхность, адсорбируясь на стенках микротрещин, что уменьшает работу на диспергирование и пластическое деформирование обрабатываемой поверхности, способствует удалению постоянно образующихся на обрабатываемой поверхности химических пленок. Благодаря моющему действию СОЖ снижается взаимодействие продуктов обработки с рабочей поверхностью инструмента, их налипание и забивание пор шламом, что обеспечивает сохранение работоспособности инструмента.

Увеличение зернистости абразивного модификатора с $\Delta = 60$ мкм до $\Delta = 320$ мкм приводит к возрастанию значений $N_{\text{ш}}$ — соответственно с 0,22 кВт до 0,45 кВт, или в 2,05 раза ($V = 8,5$ м/с, $i = 3$ мм); с 0,87 кВт до 1,65 кВт, или в 1,89 раза ($V = 26,8$ м/с, $i = 3$ мм). Размерам зерен абразивного модификатора $\Delta = 60; 120; 160; 320$ мкм соответствуют диаметры волокон полимерно-абразивного композита $d = 0,6-0,8; 0,9-1,1; 1,3-1,6; 2,3-2,8$ мм [7]. Увеличение диаметра волокон при постоянной величине вылета ворса сопровождается повышением жесткости рабочей части дисковой щетки, что вызывает увеличение удельного давления на обрабатываемую поверхность и повышение сил резания и трения (см. рисунки 2—3).

Шлифование стали 12X18H10 характеризуется меньшими затратами мощности по сравнению со шлифованием стали 45, что объясняется различными коэффициентами трения полиамида с данны-

ми материалами [8]. Увеличение натяга инструмента i при обработке со скоростью $V = 13,7$ м/с сопровождается увеличением значений $N_{\text{ш}}$ с 0,085 кВт до 0,26 кВт ($\Delta = 60$ мкм), что в 1,26—1,53 раза меньше значений $N_{\text{ш}}$ стали 45. Соответствующие показатели для обработки инструментом зернистостью $\Delta = 320$ мкм находятся в диапазоне 0,23—0,67 кВт, что меньше значений $N_{\text{ш}}$ стали 45 в 1,17—1,42 раза (см. рисунок 3 в).

Обработка при изменении натяга от 0,5 до 5 мм приводит к возрастанию значений мощности, что объясняется увеличением площади пятна контакта (от 173,6 до 538,9 мм²) и силового взаимодействия инструмента с поверхностью. Рост натяга инструмента i в диапазоне изменения зернистости $\Delta = 60-320$ мкм сопровождается увеличением значений $N_{\text{ш}}$ для стали 45 с 0,11—0,31 кВт до 0,32—0,80 кВт, или в 2,58 — 2,9 раза ($V = 13,7$ м/с); для стали 12X18H10Т — с 0,085—0,23 кВт до 0,26—0,67 кВт, или в 2,9—3,1 раза. Дальнейшее увеличение i не приводит к существенному возрастанию $N_{\text{ш}}$. Аналогичная тенденция наблюдается и при увеличении скорости резания до $V = 26,8$ м/с. Обработка результатов экспериментов, представленных на рисунке 3 а, позволила получить следующие выражения для мощности шлифования при обработке инструментом различной зернистости ($R^2 = 0,994-0,997$):

$$N_{\text{ш}1} = -11,076i^2 + 105,22i + 72,55; \quad (6)$$

$$N_{\text{ш}2} = -9,7879i^2 + 110,14i + 126,83; \quad (7)$$

$$N_{\text{ш}3} = -5,2424i^2 + 107,4i + 194,9; \quad (8)$$

$$N_{\text{ш}4} = -10,803i^2 + 164,33i + 229,18, \quad (9)$$

где $N_{\text{ш}1}-N_{\text{ш}4}$, кВт — мощность шлифования при обработке инструментом с зернистостью абразивного модификатора соответственно $\Delta = 60; 120; 160; 320$ мкм; i , мм — величина натяга.

Выводы. Общая потребляемая мощность процесса обработки полимерно-абразивными дисковыми щетками состоит из затрат мощности холостого хода и мощности шлифования, расходуемой на преодоление сил резания, трения, упругого и пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Выявлено, что на изменение эффективной мощности обработки существенное влияние оказывают увеличение скорости резания, зернистости порошка абразивного модификатора, натяга инструмента, вид обрабатываемого материала и применение СОЖ. Показано, что увеличение скорости резания, зернистости и натяга инструмента способствует возрастанию эффективной мощности обработки. Основную часть общей мощности обработки составляют затраты мощности на преодоление сил торможения, обусловленных взаимодействием инструмента с деталью. Получены эмпирические зависимости, позволяющие аналитически определять значения мощности обработки и ее составляющих в зависимости от технологических параметров процесса. При продолжении исследований по определению зависимостей силовых характеристик процесса обработки полимерно-абразивными дис-

ковыми щетками выражения (1)—(9) будут являться основой алгоритма его управления.

Обозначения

N , кВт — активная мощность, потребляемая приводом главного движения;

$N_{\text{хх}}$, кВт — мощность холостого хода;

$N_{\text{ш}}$, кВт — мощность шлифования;

V , м/с — скорость резания;

t , с — время обработки;

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

Δ , мкм — зернистость абразивного модификатора.

Список литературы

1. Устинович, Д.Ф. Финишная обработка полимерно-абразивными волоконными композитами / Д.Ф. Устинович // Инженер-механик. — 2002. — № 4(17). — С. 33—37.
2. Устинович, Д.Ф. Прогрессивная технология удаления заусенцев эластичным инструментом / Д.Ф. Устинович, В.И. Прибыльский // Вестн. ПГУ. Сер. В. — 2005. — № 6. — С. 135—139.
3. Каштальян, И.А. Компенсация мощности холостого хода привода главного движения при построении адаптивных систем управления станками с ЧПУ / И.А. Каштальян // Машиностроение: сб. науч. тр. / БНТУ; редкол.: И.П. Филонов [и др.]. — Минск, 2003. — Вып. 19. — С. 186—190.
4. Подураев, В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. — М.: Машиностроение, 1977. — 304 с.
5. Устинович, Д.Ф. Эластичный абразивный инструмент для отделочно-зачистной обработки / Д.Ф. Устинович // Современ. методы и технологии создания и обработки материалов: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3—5 окт. 2007 г. / ФТИ НАН Беларуси. — Минск, 2007. — С. 142—146.
6. Филимонов, Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. — Л.: Машиностроение, 1979. — 248 с.
7. Устинович, Д.Ф. Исследование мощности шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками / Д.Ф. Устинович // Поликомтриб-2011: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 27—30 июня 2011 г. / ИММС НАН Беларуси. — Гомель, 2011. — С. 215—216.
8. Богданович, С.П. Фрикционное взаимодействие смесей полиамид 6/ПЭВП со сталью / С.П. Богданович, С.С. Песецкий // Трение и износ. — 2001. — Т. 22, № 5. — С. 579—586.

Ustinovich D.F., Pribylsky V.I.

Effect of processing conditions on power of grinding by polymeric-abrasive disk brushes

The paper presents the results of investigating the power consumption required for carrying out the processing of parts made of constructional steels 45 and 12X18H10T by polymeric-abrasive disk brushes. It is established that changing the effective power of processing is substantially affected by increase of cutting speed, powder graininess of abrasive fiber modifier and radial deformation as well as kind of processed material and LSS use. It is shown that increase of cutting speed, graininess and radial deformation of tool contribute to increasing effective processing power. The empirical dependences obtained enable analytical determination of values of processing power and its components depending on technological process parameters.

Поступила в редакцию 08.11.2011.