

лов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

8. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхности деталей машин при обработке лезвийным инструментом // Вестник машиностроения. – 1988. – Вып. 1. – С. 40–42.

9. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 341 с.

REFERENCES

1. Agapov, S.I. *Hard-to-machine Material Working Intensification at Ultrasonic Oscillation Introduction in Cutting Area*: monograph. – Volgograd: VolgaSTU, 2009. – pp. 78.

2. Agapov, S.I., Golovkin, V.V. *Efficiency Increase in Machining by Ultrasound Application*: monograph. – Samara: Publishing House of SRC, 2010. – pp. 134.

3. Agapov, S.I., Korpelyansky, O.F. Surface roughness parameter assurance at ultrasonic cutting // *Transactions of Vol-*

gograd State Technical University. 2007. – Issue 3. – pp. 9-15.

4. Brzhozovsky, B.M., Bekrenev, N.V. *Ultrasonic Engineering Processes and Equipment in Mechanical Engineering and Instrument Making*: manual – Saratov: SSTU, 2009. – pp. 348.

5. Granovsky, G.I., Granovsky, V.G. *Metal Cutting*. – М.: Higher School, 1985. – pp. 304.

6. Kravchenko, B.A., Kravchenko, A.B. *Physical Aspects of Metal Cutting Theory*. – Samara: Samara State Technical University, 2002. – pp. 167.

7. Markov, A.I. *Ultrasonic Material Machining*. – М.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 237.

8. Suslov, A.G. Technological support of machinery surface roughness parameters at cutter edge machining // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1988. – Issue 1. – pp. 40-42.

9. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters in Surface Layers of Parts*. – М.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 341.

Рецензент д.т.н. Ю.Л. Чигиринский

УДК 621.922.025

DOI: 10.30987/article_5b0e4112491081.62554846

В.Г. Гусев, д.т.н.,

Е.В. Калиновская, магистрант

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof_gusev@mail.ru

Моделирование температуры обрабатываемой поверхности при комбинированном плоском периферийном шлифовании

Разработана методика и определены начальные и граничные условия компьютерного моделирования температуры поверхности при комбинированном и традиционном шлифовании плоскостей. Установлены зависимости, связывающие температуру обрабатываемой поверхности с величиной снимаемого припуска, продольной и поперечной подачей заготовки, на основе которых назначается режим комбинированного плоского периферийного шлифования, обеспечивающий устранение термического повреждения обработанного поверхностного слоя.

Ключевые слова: комбинированное шлифование; тепловой поток; обрабатываемая поверхность; температура; моделирование; мелко- и крупнозернистый круг.

V.G. Gusev, D. Eng.,

E.V. Kalinovskaya, Master degree student

(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

Temperature simulation of surface worked at combined flat peripheral grinding

A procedure is developed and the initial and boundary conditions of surface temperature computer simulation at combined and common plane grinding are defined. Dependences connecting the temperature of a surface worked with the value of allowance cut off, a line feed and a cross-feed of a blank are defined on the basis of which a mode of combined flat peripheral grinding ensuring the elimination of thermal damages of a surface layer worked is set.

Keywords: combined grinding; heat current; surface worked; temperature; simulation; fine-grain and coarse-grain disks.

Абразивная обработка материалов, в частности шлифование, занимает ведущее место в процессах финишной механической обработки ответственных поверхностей деталей машин. Процессы шлифования непрерывно совершенствуются в направлении дискретизации режущей поверхности инструментов, работающих как периферией [1 – 3], так и торцом [4], повышения их механической прочности [5], максимального использования функциональных свойств смазочно-охлаждающей жидкости, снижения тепловой напряженности и оптимизации режимов шлифования [6]. Особое внимание уделяется вопросам обеспечения высокого качества обработанного поверхностного слоя [7].

Одновременно с этим совершенствуются процессы сплошного шлифования стандартными кругами [8, 9]. Существующие на сегодня процессы шлифования изделий в условиях единичного и мелкосерийного производства выполняются за одну технологическую операцию, т.е. на одном шлифовальном станке. При этом предварительная обработка осуществляется крупнозернистым шлифовальным кругом, после чего круг снимают со шпинделя, на его место устанавливают мелкозернистый круг и проводят окончательную обработку с соблюдением требований по физико-механическому состоянию поверхностного слоя, микро- и макрогеометрии шлифованной поверхности.

Такая технология шлифования приводит к затратам большого количества вспомогательного времени на выполнение технологической операции (раскрепление крупнозернистого круга, снятие его со шпинделя станка, установка, закрепление мелкозернистого круга на шпинделе, его правка, балансировка и настройка на заданный размер).

В условиях среднесерийного, крупносерийного и массового производства предварительное и окончательное шлифование выполняется за две технологические операции путем раздельного проведения предварительной обработки крупнозернистым кругом и окончательной обработки – мелкозернистым. Такая обработка осуществляется, как минимум, на двух шлифовальных станках, для обслуживания которых требуется вдвое больше рабочих-шлифовщиков, производственной площади, а также транспортирование заготовки от станка для предварительного, к станку для окончательного шлифования и др.

Оба варианта построения традиционной

технологии шлифования приводят к снижению производительности обработки и увеличению технологической себестоимости изделия. Устранить указанные недостатки традиционной технологии можно на основе разработки и использования, так называемого, комбинированного шлифования, при котором на одном станке реализуется одновременно предварительная и окончательная обработка заготовки.

Комбинированное плоское периферийное шлифование реализуется следующим образом [8]. Мелкозернистый 1 и крупнозернистый 2 шлифовальные круги (рис. 1, а) закрепляют на шпинделе 3 плоскошлифовального станка так, чтобы крупнозернистый круг 2 располагался между передней опорой 4 шпинделя и мелкозернистым кругом 1. Кольцевая прокладка 5 предназначена для исключения контакта абразивного материала обоих кругов.

Заготовку 6 устанавливают на магнитном столе 7 так, чтобы она располагалась за крупнозернистым шлифовальным кругом 2 (смотрим из позиции, занимаемой оператором 8, обслуживающим станок). Включают вращение шпинделя с кругами 1 и 2 в направлении стрелки D_r (рис. 1, б) и подводят крупнозернистый шлифовальный круг 2 к заготовке до появления мелкой искры. Включают продольную подачу заготовки 6 в направлении стрелки D_{spr} , после чего опускают круг на величину припуска z_{pr} , подлежащего снятию при предварительном шлифовании. После настройки крупнозернистого круга 2 на заданный размер, включают поперечную подачу в направлении стрелки D_{sp} , т.е. в направлении к оператору 8.

Основная фракция абразивных зерен шлифовального круга 2 имеет зернистость F30-F36 ГОСТ P52381-2005, а шлифовального круга 1 – F90-F120. Круг 2 снимает основной припуск $z_{пр}$, а круг 1 – малый припуск z_0 .

В начальной стадии шлифования круг 2 контактирует с заготовкой 6 по небольшой площади, а с течением времени он начинает взаимодействовать с заготовкой по всей своей высоте. Затем в работу вступает мелкозернистый круг 1, после чего в работе одновременно находятся оба шлифовальных круга (рис. 1, б). Мелкозернистый шлифовальный круг 1 снимает гребешки, образовавшиеся при обработке кругом 2, уменьшая шероховатость поверхности. По мере перемещения заготовки в направлении поперечной подачи крупнозернистый шлифовальный круг 2 заканчивает

процесс резания, в работе остается мелкозернистый круг, который с течением времени также заканчивает обработку, обеспечивая малые значения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости Ra шлифованной поверхности. На этом основной цикл комбинированного шлифования заканчивается [8].

При высоких требованиях к шероховатости и волнистости поверхностей изделий реализуют дополнительный проход мелкозернистым кругом, при этом крупнозернистый круг 2 для предварительного шлифования не касается обрабатываемой поверхности заготовки 6 (рис. 1, в), т.е. он не ухудшает шероховатость, сформированную мелкозернистым кругом 1. Таким образом, комбинированное шлифование обеспечивает высокую геометрическую точность шлифованных поверхностей при исключении вспомогательного времени, связанного с заменой крупно- на мелкозернистый шлифовальный круг и настройкой станка на заданный размер.

Ранее отмечалось, что при комбинированном шлифовании в контакте с заготовкой одновременно находятся крупно- и мелкозернистые круги, которые генерируют тепловые потоки, отличающиеся от потоков при традиционном шлифовании и которые не рассматривались в научно-технической литературе. Моделирование температуры обрабатываемой поверхности заготовки при комбинированном шлифовании направлено на разработку зависимостей, на основании которых определяют режимы резания, не вызывающие термического повреждения шлифованного поверхностного слоя.

Моделирование температуры обрабатываемой поверхности заготовки проводили в современном CAD – комплексе Solid Works, оно заключалось в решении нестационарной задачи теплопроводности в трехмерной постановке. Для разбиения твердотельной модели заготовки на отдельные конечные элементы тетраэдры и создания сетки использовали метод конечно-элементного анализа (DEM). Разработанная конечно-элементная модель заготовки состоит из 98 794 узлов и 552 812 элементов сетки, что позволило максимально точно проанализировать результаты исследования.

Твердотельную модель заготовки разбили на участки 1 – 3 (рис. 2), к которым прикладывали тепловой поток q , генерируемый процессом шлифования. Размеры твердотельной модели заготовки определяются площадью

контакта шлифовальных кругов с обрабатываемой поверхностью, а также размерами их режущих поверхностей.

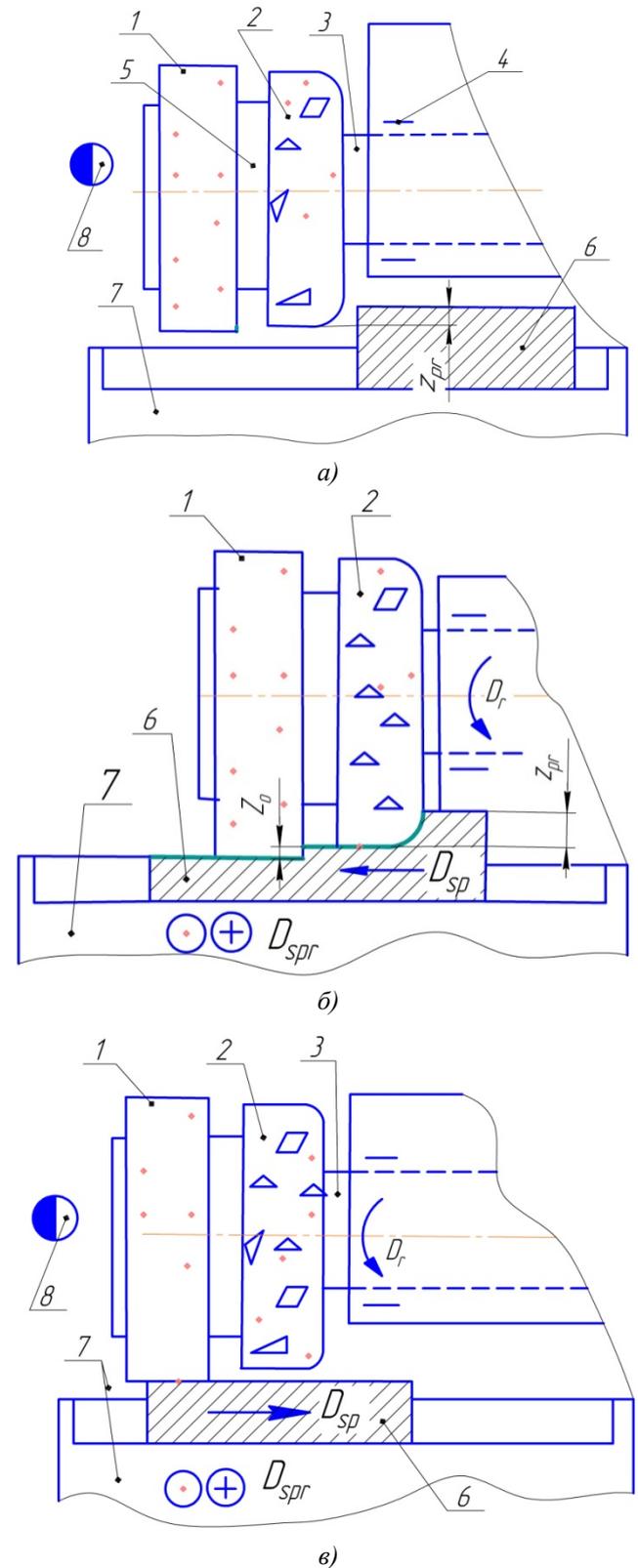


Рис. 1. Фрагменты комбинированного шлифования:
 а – исходное положение заготовки и шлифовальных кругов; б – одновременная обработка заготовки двумя кругами, в – дополнительный проход мелкозернистым кругом

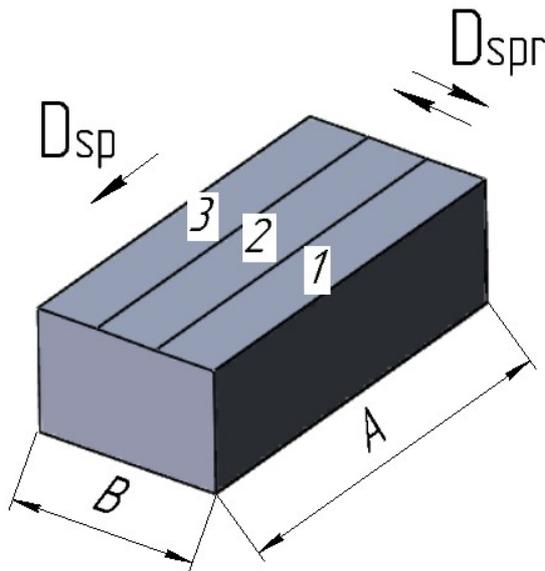


Рис. 2. Участки обрабатываемой поверхности твердотельной модели заготовки, к которым подводится тепловой поток

При обработке заготовка перемещается в направлении продольной D_{spr} и поперечной D_{sp} подачи, при этом поверхности, контактирующие с шлифовальными кругами, охлаждаются в результате конвективного теплообмена, определяемого коэффициентом теплоотдачи α .

Значения температурного поля, образованного в результате контакта шлифовального круга с заготовкой на участках 1 и 3, использовали в качестве начальных условий для последующего этапа моделирования, при котором тепловой поток q прикладывали к участку 2, значения температурного поля которого являлись конечным результатом моделирования.

Для рационального использования ресурса программного комплекса Solid Works длину A твердотельной модели заготовки определяли путем суммирования высот кругов для предварительного и окончательного шлифования, а ширину B твердотельной модели – суммированием 3-х длин дуг контакта шлифовального круга с заготовкой. Дуга контакта шлифовального круга с заготовкой является криволинейной, её радиус кривизны равен радиусу режущей поверхности шлифовального круга $R = 125$ мм.

Длину твердотельной модели заготовки разбили на участки протяженностью 1 мм, что позволило выполнять расчеты при различных значениях поперечной подачи без изменения исходной модели. Точность расчетов температуры при моделировании зависит от корректного задания граничных условий теплообмена между обрабатываемой заготовкой и окру-

жающей средой. Для зоны контакта шлифовального инструмента и заготовки характерны граничные условия второго рода, при которых задается тепловой поток, а за пределами этой зоны, функционирует охлаждающая среда и справедливы граничные условия третьего рода, которые задавались условиями конвективного теплообмена.

Количество теплоты, уходящей в заготовку, зависит от режима шлифования, теплофизических характеристик материала шлифовального инструмента, заготовки и составляет 60...90 % от общего количества выделившегося в зоне резания тепла. Мощность (кВт), затрачиваемая на процесс резания, определяли по формуле

$$N_{rez} = C_n D_{spr}^r t^x D_{sp}^y, \quad (1)$$

где C_n , r , x , y – соответственно постоянный коэффициент и показатели степени при продольной подаче D_{spr} заготовки, м/мин; глубине шлифования t , мм и поперечной подаче D_{sp} , мм/двойной ход стола.

Плотность теплового потока, уходящего в заготовку, определяли по формуле

$$q = (0,6 - 0,9) \frac{N_{rez}}{S_k}, \quad (2)$$

где S_k – площадь контакта инструмента и заготовки.

Максимальные площади контакта соответственно крупно- и мелкозернистого шлифовального круга с заготовкой возникают при резании всей высотой круга и определяются по формулам:

$$S_{k1} = B_1 L_1 = B_1 \left(1 \pm \frac{D_{spr}}{v} \right) \sqrt{t_1 D_1}, \quad (3)$$

$$S_{k2} = B_2 L_2 = B_2 \left(1 \pm \frac{D_{spr}}{v} \right) \sqrt{t_2 D_2}, \quad (4)$$

где B_1 , L_1 , t_1 , D_1 , B_2 , L_2 , t_2 , D_2 – высота шлифовального круга, длина дуги контакта с заготовкой, глубина шлифования, диаметр режущей поверхности крупно- и мелкозернистого шлифовального круга соответственно; v – скорость резания.

Для определения текущей площади контакта крупно- и мелкозернистого шлифовального круга с заготовкой в выражениях (3) и (4) вместо высоты B_1 и B_2 следует подставить фактическую протяженность контакта круга с заготовкой, измеренную по образующей режущей поверхности инструмента.

В качестве охлаждающей среды использовался воздух, для которого коэффициент теп-

коэффициента теплообмена $\alpha = 50 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$. Материал шлифуемой заготовки – сталь 9ХС, у которой плотность $\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 27 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; удельная теплоемкость $c = 640 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Для моделирования температуры шлифуемой поверхности необходимо знать также время нагрева и охлаждения рассматриваемой зоны заготовки, для этого была составлена расчетная схема, согласно которой в процессе обработки шлифовальный круг 1 контактирует с заготовкой 2 (рис. 3), установленной на магнитном столе 3, при этом исследуемая зона 4 нагревается.

Время нагрева зоны 4 в секундах равно:

$$\tau_n = \frac{60 L_4}{D_{spr}} \quad (5)$$

Время охлаждения зоны 4 зависит от продольной подачи D_{spr} , ширины B_z заготовки, диаметра режущей поверхности круга и определяется по формуле

$$\tau_o = \frac{60(B_z - L_4 + L_{vrez} + L_{per})}{D_{spr}} \quad (6)$$

где L_4 – проекция длины дуги контакта шлифовального круга с заготовкой на горизонтальную плоскость, м; L_{vrez} , L_{per} – длина врезания и перебега шлифовального круга соответственно.

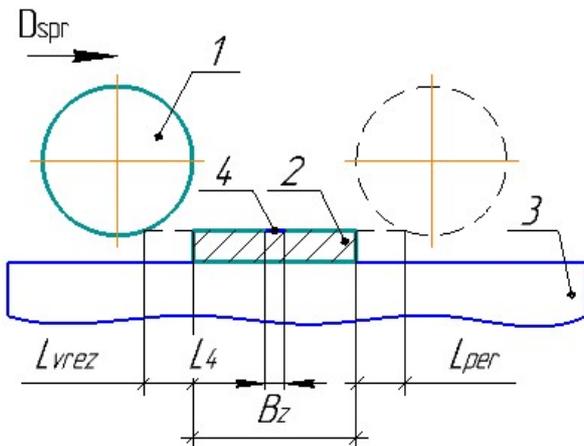


Рис. 3. Схема для расчета времени нагрева и охлаждения заготовки

Моделирование проведено для различных значений глубины шлифования, продольной и поперечной подачи при следующих геометрических характеристиках инструмента для комбинированного шлифования: высота режущей поверхности круга для предварительного шлифования $B_1 = 20 \text{ мм}$, высота режущей поверхности круга для окончательного шлифования $B_2 = 10 \text{ мм}$, ширина кольцевой проклад-

ки между шлифовальными кругами $\delta = 2 \text{ мм}$, диаметр режущей поверхности круга для предварительного шлифования $D_1 = 250 \text{ мм}$, для окончательного шлифования $D_2 = 250,01 \text{ мм}$. Размеры обрабатываемой заготовки: длина – 100 мм, ширина – 100 мм, высота – 10 мм.

Для продольной подачи $D_{spr} = 15 \text{ м/мин}$, поперечной подачи $D_{sp} = 3 \text{ мм/ход}$ стола, скорости резания $v = 35 \text{ м/с}$; припуска, снимаемого кругом для предварительного шлифования $z_{pr} = 60 \text{ мкм}$; кругом для окончательного шлифования $z_o = 5 \text{ мкм}$, максимальное значение температуры на исследуемом участке заготовки при обработке крупнозернистым кругом составило $309,1 \text{ }^\circ\text{C}$, а при обработке мелкозернистым кругом – $102,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4).

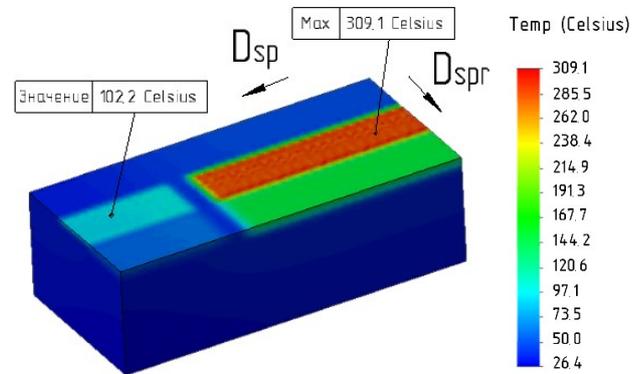


Рис. 4. Участки, обрабатываемые крупно- и мелкозернистым кругом, и температурное поле поверхности при комбинированном шлифовании

Сравнивали температуры поверхностей при комбинированном и традиционном шлифовании заготовки крупно- и мелкозернистым кругом. Начальную температуру заготовки принимали равной температуре окружающей среды $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты моделирования показали, что при комбинированном шлифовании крупнозернистым кругом температура обрабатываемой поверхности $309 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 4) превышает на 6,5 % температуру $289 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 5), возникающую при традиционной обработке аналогичным кругом.

Повышение температуры при комбинированном шлифовании по сравнению с традиционным объясняется тем, что тепловые потоки, генерируемые мелкозернистым кругом в процессе обработки, препятствуют, хотя и в незначительной степени, отводу тепла из зоны резания крупнозернистым кругом. После традиционной обработки поверхности мелкозернистым кругом значение температуры поверхности составило $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 6).

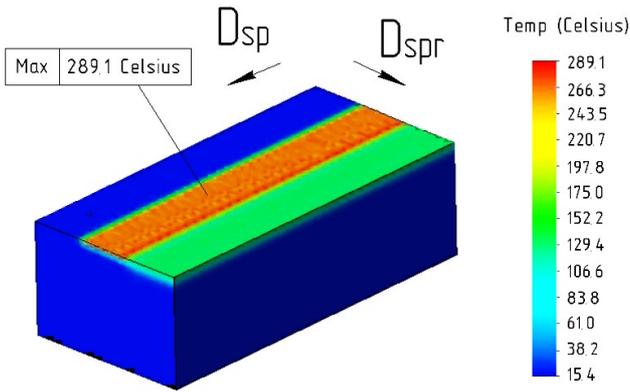


Рис. 5. Участки, обрабатываемые крупнозернистым кругом, и температурное поле поверхности при традиционном шлифовании

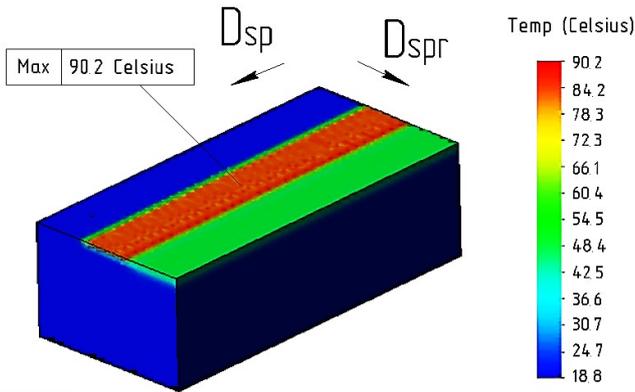


Рис. 6. Участки, обрабатываемые мелкозернистым кругом, и температурное поле поверхности при традиционном шлифовании

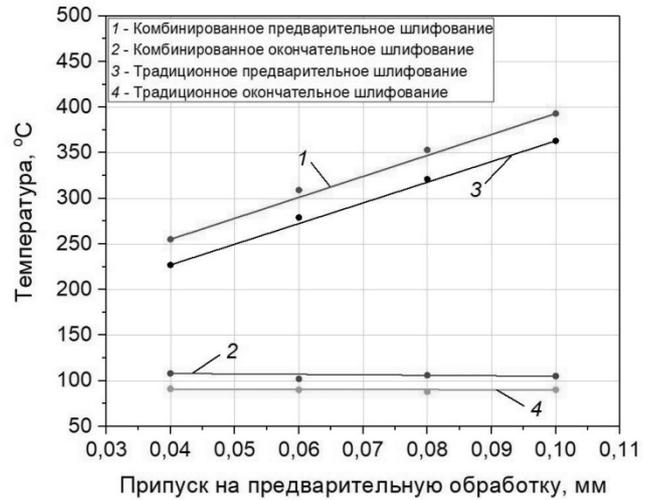
Было установлено, что абсолютная температура в процессе комбинированного шлифования мелкозернистым кругом составила 102 °С (см. рис. 4), а при традиционной обработке крупнозернистым кругом – 289 °С (см. рис. 5), что ниже в среднем на 60 %.

С практических позиций весьма важной является информация о влиянии доминирующих факторов процесса совмещенного шлифования на максимальную температуру обрабатываемой поверхности, в этой связи были исследованы тепловые поля при различных значениях продольной, поперечной подачи и величины снимаемого припуска. Получены экспериментальные модели и построены графики зависимости температуры в функции элементов режима резания (рис. 7).

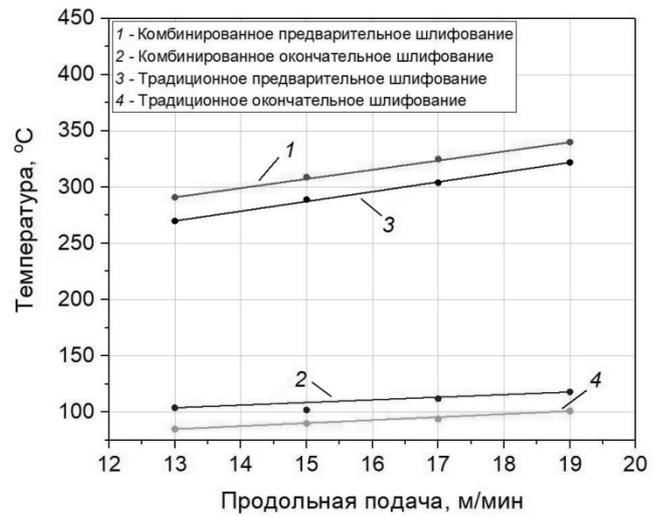
Уравнения, характеризующие зависимость максимальной температуры обрабатываемой поверхности от величины снимаемого припуска, при шлифовании крупнозернистым кругом по предлагаемой и традиционной технологии соответственно имеют вид:

$$T_{кб} = 2300 z_{pr} + 165, \quad (7)$$

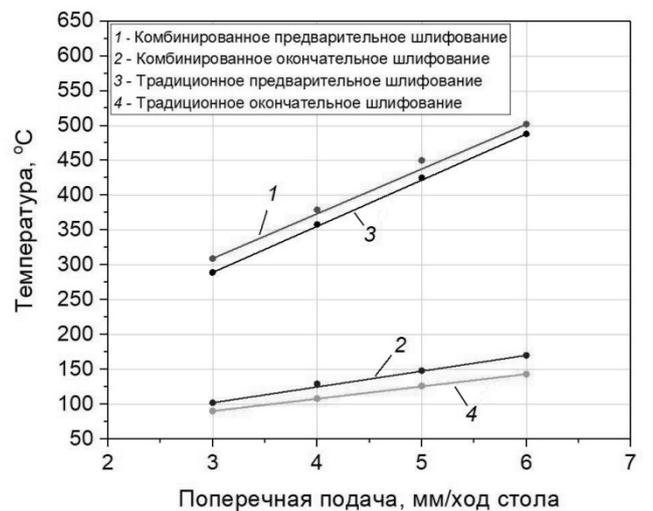
$$T_{тр} = 2300 z_{pr} + 135. \quad (7.1)$$



а)



б)



в)

Рис. 7. Изменение температуры поверхности в функции величины снимаемого припуска (а), продольной (б) и поперечной (в) подачи заготовки при комбинированном и традиционном шлифовании

Температура поверхности заготовки на участке, обрабатываемом мелкозернистым

кругом, от значения припуска z_{pr} не зависит, а уравнения прямых, расположенных внизу графика, соответственно для предлагаемой и традиционной технологии имеют вид:

$$T_{кб} = 105, T_{тр} = 95.$$

При увеличении припуска, снимаемого в процессе комбинированного шлифования, происходит значительное возрастание температуры той части обрабатываемой поверхности, которая контактирует с крупнозернистым кругом (рис. 4, центральная правая полоса). Так, при изменении припуска от 0,04 до 0,10 мм температура поверхности, контактирующей с крупнозернистым шлифовальным кругом, увеличилась с 255 до 393 °С (рис. 7, верхняя прямая), в то время как температура поверхности заготовки, контактирующей с мелкозернистым кругом (рис. 4, центральная короткая левая полоса), практически не изменилась (рис. 7, нижняя прямая).

Иными словами, какой припуск при комбинированном шлифовании мы не назначали бы, температура поверхности, обрабатываемой мелкозернистым кругом, практически не изменяется, что объясняется снятием мелкозернистым кругом постоянного и незначительного по величине припуска (5...7 мкм). Величина этого припуска определяется полуразностью диаметров мелко- и крупнозернистого кругов и не зависит от припуска, назначаемого на предварительную обработку (упругие перемещения шпиндельного узла с шлифовальными кругами под действием радиальной составляющей силы резания не учитываем).

Температура поверхности при совмещенном шлифовании по сравнению с традиционным отличается незначительно, вследствие чего прямые, характерные для крупнозернистого круга, отстоят по оси ординат на 30 °С, а для мелкозернистого круга – на 10 °С.

Полученный результат моделирования приводит к выводу о том, что в процессе комбинированного шлифования появляется возможность назначать необходимый припуск на предварительное шлифование без ухудшения физико-механического состояния обработанного поверхностного слоя. Высокие температуры, возникающие на поверхности в процессе обработки кругом для предварительного шлифования, снижаются при обработке мелкозернистым кругом для окончательного шлифования, а образованный в результате воздействия высоких температур дефектный поверхностный слой можно удалить мелкозернистым кругом, не заменяя при этом круп-

нозернистый круг.

Увеличение продольной подачи заготовки также вызывает возрастание температуры шлифуемой поверхности, но её влияние на тепловую напряженность процесса сравнительно меньше, чем величина снимаемого припуска. Изменение продольной подачи при комбинированном шлифовании от 13 до 19 м/мин приводит к увеличению температуры шлифуемой поверхности от 291 до 340 °С (рис. 8, верхняя прямая линия), а при традиционном шлифовании – от 271 до 320 °С.

Прямые линии, расположенные сверху графика, характерны для предварительного шлифования, а прямые линии внизу графика – для окончательного. Анализируя данные графика, можно сделать вывод о том, что при изменении продольной подачи температура в поверхностном слое заготовки изменяется в меньшей степени, чем при изменении припуска.

Уравнения, связывающие максимальную температуру поверхности с продольной подачей заготовки соответственно при комбинированном и традиционном шлифовании, имеют вид:

– для крупнозернистого круга:

$$T_{кб} = 8,2 D_{spr} + 185, \quad (8)$$

$$T_{тр} = 8,2 D_{spr} + 165, \quad (9)$$

– для мелкозернистого круга:

$$T_{кб} = 2,3 D_{spr} + 76, \quad (10)$$

$$T_{тр} = 2,3 D_{spr} + 55. \quad (11)$$

Верхние прямые линии (см. рис. 7 и 8) получены при контакте заготовки по всей высоте круга, когда в зоне резания выделяется максимальное количество тепла и возникают максимальные значения температуры обрабатываемой поверхности. Нижние прямые линии отражают изменение температуры поверхности заготовки, контактирующей по всей высоте круга, когда рассматриваемый участок прошел предварительную обработку крупнозернистым кругом и выполняется его окончательная обработка мелкозернистым.

Поперечная подача заготовки в наибольшей степени влияет на температуру обрабатываемой поверхности по сравнению с другими выше рассмотренными независимыми факторами процесса шлифования. Изменение поперечной подачи от 3 до 6 мм на каждый ход стола вызывает увеличение максимальной температуры поверхности, обрабатываемой крупнозернистым кругом, от 309 до 502 °С (рис. 9), а поверхности, обрабатываемой мелкозернистым кругом, – от 102 до 170 °С.

Углы наклона верхней и нижней прямых (см. рис. 9) больше углов наклона однотипных прямых, представленных на рис. 7 и 8, на основании чего можно сделать вывод о том, что поперечная подача заготовки при шлифовании является доминирующим фактором, опреде-

ляющим тепловую напряженность процесса.

Уравнения, связывающие максимальную температуру поверхности с поперечной подачей заготовки, при комбинированном и традиционном шлифовании крупно- и мелкозернистым кругом соответственно имеют вид:

$$T_{кб} = 64,3 D_{sp} + 120, \quad (12)$$

$$T_{тр} = 64,3 D_{sp} + 102, \quad (13)$$

– мелкозернистым кругом

$$T_{кб} = 22,7 D_{sp} + 33, \quad (14)$$

$$T_{тр} = 22,7 D_{sp} + 18. \quad (15)$$

Из (12) – (15) также следует, что при увеличении поперечной подачи заготовки происходит значительное возрастание температуры на участке, обрабатываемом кругом для предварительного шлифования. Возрастание температуры происходит также и на участке, подвергнутом окончательному шлифованию, однако это возрастание температуры происходит в меньшей степени, чем в первом случае.

Проблему снижения качества обработки из-за образования дефектов в поверхностном слое заготовки можно решить путем назначения соответствующего припуска под окончательную обработку, а также продольной и поперечной подачи заготовки. В случае возникновения термического повреждения поверхностного слоя под действием крупнозернистого круга, припуск на окончательную обработку должен быть назначен больше толщины дефектного слоя, сформированного в процессе предварительного шлифования.

Таким образом, в результате проведенного моделирования в современном программном комплексе Solid Works максимальной температуры поверхностей, подвергаемых комбинированному шлифованию, установлены закономерности, связывающие температуру с величиной снимаемого припуска, продольной и поперечной подачей заготовки, что позволяет обоснованно назначать режим шлифования, обеспечивающий значения температуры, при котором не возникает термическое повреждение обработанного поверхностного слоя.

Максимальная температура поверхности при комбинированном шлифовании примерно такая же, как и при традиционном шлифовании крупно- и мелкозернистым кругом, вследствие чего предлагаемый способ шлифования не уступает традиционному в плане технологического назначения режима резания. Вместе с этим, комбинированное шлифование позволяет реализовать на одном станке одновременно предварительную и окончательную обработку поверхностей, что исключает вспомогательное время на замену крупно- на мелкозернистый круг, его балансировку и правку, а также настройку на требуемый размер, что

способствует повышению производительности технологической операции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография [текст]. – Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с. ISBN 978-5-905371-38-7.
2. Пат. № 2385216 Российская Федерация, В24D, 7/00. Дискретный шлифовальный инструмент / Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С.; опубл. 2010. Бюл. № 9.
3. Морозов, А.В., Гусев, В.Г. Дискретное плоское торцовое шлифование монография [текст]. – М.: Издательство «Перо», 2016. – 124 с. ISBN 978-5-906927-57-6.
4. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 9(75). – С. 21 – 27.
5. Морозов, А.В., Гусев, В.Г. Моделирование напряженного состояния режущей поверхности дискретного шлифовального круга // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 10(76). – С. 23 – 29.
6. Морозов, А.В., Гусев, В.Г. Моделирование температуры заготовки, шлифуемой торцовым сплошным и сегментным кругами, в САЕ-комплексе Solid Works // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 11(77). – С. 18 – 23.
7. Сулов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
8. Пат. №2606143 Российская Федерация. В24D5/14, В24B7/02. Способ шлифования // Гусев В.Г., Морозов А.В.; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.
9. Ермаков, Ю.М., Степанов, Ю.С. Перспективы развития абразивно-алмазной обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 3 (287). – С. 85 – 90.

REFERENCES

1. Gusev, V.G., Morozov, A.V. *Flat Peripheral Grinding with Discrete Disks*: monograph [text]. – Yoshkar-Ola: Colloquium, 2012. – pp. 222. ISBN 978-5-905371-38-7.
2. Pat. No. 2385216 The Russian Federation, B24D, 7/00. *Discrete Grinding Tool* / Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagir P.S.; published. 2010. Bull. No.9.
3. Morozov, A.V., Gusev, V.G. *Discrete Flat End Grinding*: monograph [text]. – M.: “Pero” Publishing House, 2016. – pp. 124. ISBN 978-5-906927-57-6.
4. Gusev, V.G., Morozov, A.V. Technology of disk working surface discretization by laser and hydro-abrasive jet // *Science Intensive in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.9 (75). – pp. 21-27.
5. Morozov, A.V., Gusev, V.G. Stressed state simulation of cutting surface in discrete grinding disk // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.10 (76). – pp. 23-29.
6. Morozov, A.V., Gusev, V.G. Temperature simulation of blank grinded with end solid and segment disks in CAE-complex Solid Works // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.11 (77). – pp. 18-23.
7. Suslov, A.G. *Quality of Machinery Surface Layer*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
8. Pat. No.2606143 The Russian Federation. B24D5/14, B24B7/02. *Grinding Method* // Gusev V.G., Morozov A.V.; published 10.01.2017. Bull. No.1.
9. Ermakov, Yu.M., Stepanov, Yu.S. Outlooks in development of abrasive-diamond processing // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2011. – No.3 (287). – pp. 85-90.

Рецензент д.т.н. В.И. Денисенко