

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЛЕПЕСТКОВЫМИ КРУГАМИ

© 2022 А.Н. Унянин, В.С. Чистяков

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 15.04.2022

Приведены математические зависимости для расчета расстояния между режущими зёрнами лепесткового круга. Выполнено численное моделирование температурного поля, возникающего в процессе шлифования лепестковыми кругами заготовок из сплава Д16. Температурное поле фиксировали при изменении номера последовательно работающего абразивного зерна и при варьировании расстоянием между зёрнами. Установлены закономерности изменения мощностей источников тепловыделения, локальных температур и температур в поверхностном слое заготовки в зависимости от номера последовательно работающего зерна и расстояния между абразивными зёрнами.
Ключевые слова: шлифование, температура, численное моделирование, лепестковый круг.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-2-27-32

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 19-48-730002

ВВЕДЕНИЕ

Для полирования и удаления дефектного слоя с поверхностей заготовок широко используются лепестковые круги.

Процесс обработки лепестковыми кругами исследован достаточно полно. Получены результаты исследования сил шлифования [1, 2, 3], производительности процесса и формирования качества обработанной поверхности [1, 4].

Поскольку процесс шлифования реализуется с высокой рабочей скоростью круга, возникает высокая интенсивность тепловыделения в зоне обработки и высокие температуры. Температура оказывает влияние на работоспособность инструмента и качество обработанных деталей. Однако аналитическое исследование и численное моделирование температурного поля, возникающего в процессе обработки лепестковыми кругами, до сих пор не выполнено.

Для расчета температурного поля были разработаны физические и математические модели, представленные в работах [5, 6]. Модели учитывают: тепловыделения в зоне деформирования и в зонах контакта абразивных зёрен со стружкой и заготовкой; перемещение абразивных зёрен относительно заготовки и стружки относительно зёрен; наложение тепловых источников от отдельных зёрен; зависимость теплофизических свойств заготовки, абразивного зерна и лепестка

и механических свойств материала заготовки (напряжений в зоне деформации) от температуры. Моделирование температурного поля выполнено на основе совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, записанных для заготовки, лепестка круга, стружки и абразивного зерна. Разработаны методика, алгоритм и пакет программ численного решения задачи с применением метода конечных элементов [5, 6].

Адекватность принятых физических и математических моделей реальным условиям доказана путем сравнения экспериментальных значений средней контактной температуры в зоне шлифования и локальной температуры с расчетными значениями [7].

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Одним из параметров, оказывающих влияние на температурное поле шлифования, является расстояние между абразивными зёрнами. Зёрна располагаются на лепестках, изготовленных из шлифовальной шкурки.

Режущие зёрна лепестка располагаются на расстоянии u от его условной наружной поверхности: $0 \leq u \leq h_u + a_m$, где h_u – износ абразивного зерна, m ; a_m – максимальная глубина внедрения зерна в заготовку, m :

$$a_m = S_{\text{прз}} \cdot \sin \alpha_{\text{max}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{прз}}$ – продольная подача на одно зерно круга, m ; α_{max} – угол, град. [7].

Расстояние между режущими зёрнами:

$$\ell_m = \frac{1}{\sqrt{z_0 \cdot F(h_u + a_m)}}, \quad (2)$$

Унянин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии в машиностроении». E-mail: a_un@mail.ru
Чистяков Владимир Сергеевич, магистрант. E-mail: v_s_chistyakov@mail.ru

где z_0 – число зерен на единичной площадке, находящейся на рабочей поверхности лепестка, $1/m^2$; $F(h_u + a_m)$ – функция распределения вершин зерен, которую можно аппроксимировать, в частности, степенной зависимостью [7].

При небольших глубинах внедрения зерна в заготовку, которое имеет место при обработке лепестковыми кругами, можно полагать, что число зерен, контактирующих с заготовкой, увеличивается линейно с увеличением глубины их залегания в лепестке:

$$F(h_u + a_m) = c_k \cdot (h_u + a_m), \quad (3)$$

где c_k – коэффициент: $c_k = 1/\Delta$, где Δ – толщина рабочего слоя лепестка, м.

Число зерен на единичной площадке, находящейся на рабочей поверхности лепестка, можно определить по зависимости [8]:

$$z_0 = \frac{k \cdot 10^9}{p}, \quad (4)$$

где k – коэффициент засыпки зерен; p – размер зерна, мкм.

В процессе обработки лепестковый круг располагают относительно обрабатываемой поверхности заготовки на расстоянии, при котором лепестки деформируются. Сила, с которой лепестковый круг воздействует на обрабатываемую поверхность, складывается из центробежной и упругой составляющих [4], причем последняя зависит от деформации лепестка. Сила, с которой лепестковый круг воздействует на заготовку, должна быть равна силе диспергирования кругом материала заготовки.

При значительной деформации δ лепестка расстояние между рабочими частями деформированных лепестков l_l может быть весьма мало и его значением можно пренебречь. В данном случае для расчета расстояния между зернами можно использовать зависимость (2).

Когда деформация лепестка в процессе шлифования незначительная, при расчете следует учесть расстояние между смежными лепестками. В этом случае среднее расстояние между зернами можно определить как

$$l_{ms} = \frac{1}{2}(\ell_m + \ell_l). \quad (5)$$

Для расчета расстояния между деформированными лепестками получена зависимость (рис. 1):

$$\ell_l = \frac{t_l \cdot (R + L) - R \cdot \ell_p}{R}, \quad (6)$$

где t_l – толщина лепестка, м; l_p – размер рабочей (деформированной) части лепестка, м; R – радиус ступицы шлифовального круга, м; L – длина лепестка, м.

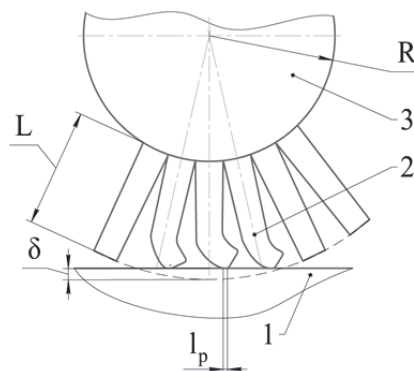


Рис. 1. Схема к расчету расстояния между деформированными лепестками: 1 – заготовка; 2 – лепесток круга; 3 – ступица

Размер деформированной части лепестка можно определить по зависимости [4]:

$$\ell_p = C_N \cdot \delta^{0,365} \cdot \omega^{0,628} \cdot L^{0,123}, \quad (7)$$

где C_N – коэффициент, зависящий от свойств шлифовальной шкурки, из которой изготовлен лепесток; δ – деформация лепестка, мм; ω – угловая скорость круга, c^{-1} ; L – длина лепестка, мм.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование температур выполнено при следующих исходных данных: плоское многопроходное шлифование периферией лепесткового круга; материал заготовки – сплав Д16; материал абразивного зерна шлифовального круга – электрокорунд нормальный; зернистость F100; рабочая скорость круга $V_k = 35$ м/с; скорость продольной подачи – 3 м/мин; глубина шлифования $t = 0,005$ мм. Теплофизические характеристики абразивных зерен приведены в работе [7], лент – в работе [8]. Моделировали процесс шлифования без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

Фиксировали температуру T_2 на площадке EV контакта абразивного зерна с заготовкой и T_1 на площадке NE контакта зерна со стружкой (рис. 2), а также температуру T заготовки на различных расстояниях (глубинах) от обрабатываемой поверхности при движении через зону шлифования 26-го, 30-го и 40-го зерна, т. е., когда диспергируется материал заготовки, прогретый в результате работы предыдущих зерен. Фиксировали температуры в моменты времени $1,35 \cdot 10^{-5} \dots 2,67 \cdot 10^{-5}$ с от начала контакта зерна с заготовкой и рассчитывали средние температуры за этот период времени.

Варьировали расстоянием между зернами круга. При небольших значениях деформации лепестка δ , когда размер деформированной части лепестка l_p значительно меньше расстояния между зернами l_m , расположенными на одном

лепестке, и расстояния между лепестками l_p , на каждом лепестке в плоскости, перпендикулярной оси круга, разместится одно режущее зерно и расстояние между зернами будет равно расстоянию между недеформированными лепестками:

$$l_{ms} = \frac{t_l \cdot (R + L)}{R} \quad (8)$$

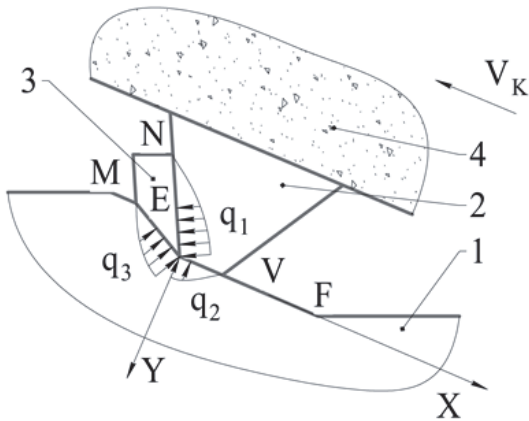


Рис. 2. Схема теплообмена в зоне контакта режущего зерна с заготовкой:
1 – заготовка; 2 – зерно; 3 – стружка; 4 – лепесток

При размерах круга $t_l = 1$ мм; $R = 30$ мм и $L = 20$ мм расстояние l_{ms} равно 1,7 мм.

Для условий, когда имеет место значительная деформация лепестка, расстояние между зернами, рассчитанное по зависимости (2), равно 0,97 мм. Исходные данные для расчета числа зерен на единичной площадке лепестка z_0 и толщину рабочего слоя лепестка Δ принимали по данным работы [8].

При замене части лепестков прокладками расстояние между лепестками увеличивается, поэтому моделирование выполнили при значении l_{ms} , равном 4 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С увеличением номера последовательно работающего абразивного зерна температура деформируемого слоя материала заготовки T_d увеличивается (табл. 1). Это приводит к снижению предела прочности материала заготовки и функционально связанных с ним напряжений деформирования. Поэтому при увеличении T_d уменьшаются мощности источников тепловыделения: при работе 40-го зерна мощности источников W_1 , W_g и W_2 меньше, чем при работе 25-го зерна на 8,4, 8,7 и 8,6%.

Уменьшение мощностей источников тепловыделения должно привести к соответствующему уменьшению температур. Однако, при увеличении температуры заготовки, с которой контактирует абразивное зерно, температуры на площадках контакта также увеличиваются, но в незначительной степени: при работе 40-го зерна локальные температуры T_1 , T_2 и T_E выше, чем при работе 25-го зерна, в среднем на 0,5%.

Температуры в поверхностных слоях заготовки на глубинах 1,5, 13,8 и 67 мкм увеличиваются с увеличением номера последовательно работающего зерна. При увеличении номера зерна интенсивность увеличения температур уменьшается. Температура на глубинах 1,5 и 13,8 мкм от 40-го зерна на 2% выше, чем от 36-го. Поэтому можно считать, что после воздействия на заготовку 40 зерен тепловой процесс в поверхностных слоях заготовки является установившимся.

Температура в поверхностных слоях заготовки уменьшается с увеличением расстояния от обрабатываемой поверхности. При работе 40-го зерна на расстояниях от поверхности 13,8 и 67 мкм температура ниже, чем на расстоянии 1,5 мкм, на 4 и 23 % соответственно.

Таблица 1. Параметры процесса шлифования в зависимости от номера последовательно работающего абразивного зерна: $l_{ms} = 0,97$ мм

Номер последовательно работающего зерна	Температура деформируемого слоя заготовки T_d, K	Мощности источников тепловыделения [Вт] в зонах контакта			Средняя температура [K] на площадках контакта		Температура на вершине зерна T_E, K	Температура заготовки $T [K]$ на расстоянии от обрабатываемой поверхности [мкм]			
		стружки с зерном W_1	в зоне деформирования W_g	зерна с заготовкой W_2	стружки с зерном T_1	зерна с заготовкой T_2		1,5	13,8	67	207
25	604	2,98	8,75	1,98	1183	1094	1246	690	654	502	322
36	652	2,81	8,19	1,86	1193	1110	1253	740	707	560	350
40	664	2,73	7,99	1,81	1192	1112	1252	754	723	580	362

При увеличении расстояния между зернами увеличивается интервал времени между работой абразивных зерен (табл. 2). Увеличивается также интервал времени между окончанием работы зерна и вступлением в работу следующего зерна, т. е. время, в течение которого материал заготовки остывает между работой зерен. Моделирование производили без применения смазочно-охлаждающей жидкости, поэтому за счет конвективного теплообмена с окружающей средой (воздухом) поверхностный слой заготовки остывает незначительно. Очевидно, что температура деформируемого слоя T_d снижается, в основном, за счет интенсивной передачи теплоты во внутренний объем заготовки из сплава Д16, имеющего высокий коэффициент теплопроводности (табл. 3).

При увеличении расстояния между зернами от 0,97 до 4 мм температура деформируемого слоя T_d снижается на 26%. При уменьшении T_d увеличивается интенсивность напряжений в зоне деформирования, что приводит к росту силы диспергирования зерном и сил трения зерна о заготовку и стружки о зерно. Увеличение сил происходит также вследствие изменения глубины внедрения зерна в заготовку (см.

табл. 2). Однако глубина внедрения увеличивается незначительно, поскольку она определяется, главным образом глубиной критического внедрения зерна в заготовку, которая для данных условий равна 3 мкм. Поэтому в данном случае изменение глубины внедрения зерна не оказывает заметного влияния на увеличение сил резания и трения.

С увеличением сил увеличиваются мощности источников тепловыделения. При увеличении расстояния между зернами от 0,97 до 4 мм мощности источников W_1 , W_g и W_2 увеличиваются на 7,4, 6,9 и 8,6 %. Однако незначительное увеличение мощностей тепловыделения не компенсирует отвода большего количества теплоты из поверхностных слоев заготовки при увеличении интервала времени между работой зерен. Поэтому температура в поверхностных слоях заготовки с увеличением расстояния l_{ms} уменьшается. При увеличении l_{ms} от 0,97 до 4 мм температуры на расстоянии от поверхности 1,5, 13,8 и 67 мкм уменьшаются на 23,2 23 и 11 % соответственно.

Температура заготовки на глубине 207 мкм при увеличении расстояния между зернами увеличивается на 11,5%. Это можно объяснить тем,

Таблица 2. Параметры процесса шлифования при различных расстояниях между зернами

Параметры процесса шлифования	Расстояние между зернами l_{ms} , мм		
	0,97	1,7	4
Интервал времени между работой абразивных зерен, с	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$4,79 \cdot 10^{-5}$	$11,37 \cdot 10^{-5}$
Интервал времени между окончанием работы зерна и вступлением в работу следующего зерна, с	$0,08 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	$8,66 \cdot 10^{-5}$
Максимальная глубина внедрения зерна в заготовку, м	$3,01 \cdot 10^{-6}$	$3,03 \cdot 10^{-6}$	$3,07 \cdot 10^{-6}$

Таблица 3. Зависимость параметров процесса шлифования от расстояния между зернами, зафиксированных при работе 25-го зерна

Расстояние между зернами l_{ms} , мм	Температура деформируемого слоя заготовки T_d , К	Мощности источников тепловыделения [Вт] в зонах контакта			Средняя температура [К] на площадках контакта		Температура на вершине зерна T_E , К	Температура заготовки T [К] на расстоянии от обрабатываемой поверхности [мкм]			
		стружки с зерном W_1	в зоне деформирования W_g	зерна с заготовкой W_2	стружки с зерном T_1	зерна с заготовкой T_2		1,5	13,8	67	207
0,97	604	2,98	8,75	1,98	1183	1094	1246	690	654	502	322
1,7	533	3,14	9,18	2,08	1136	1043	1202	624	592	486	340
4	445	3,2	9,35	2,15	1045	956	1116	531	503	445	359

что изменение времени остывания заготовки с увеличением расстояния между зернами не оказывает влияния на температуру на больших глубинах. Увеличение температуры заготовки на большой глубине связано с увеличением мощностей источников тепловыделения.

Температуры в зонах контакта зерна со стружкой T_1 и заготовкой T_2 с увеличением l_{ms} снижаются, но в меньшей степени, чем температуры в поверхностных слоях заготовки – на 12%; температура на вершине зерна (точка E на рис. 2) – на 10%.

Установлено, что при увеличении скорости продольной подачи до 6 м/мин или глубины шлифования до 0,01 мм при $l_{ms} = 4$ мм температуры на площадках контакта и в поверхностных слоях заготовки ниже, чем при $l_{ms} = 1,7$ мм, скорости продольной подачи 3 м/мин и глубине шлифования 0,005 мм. Следовательно, если в качестве технических ограничений использовать температуры шлифования, то возможно повышение производительности обработки при использовании кругов, условий и режима, обеспечивающих увеличение расстояния между абразивными зернами.

ВЫВОДЫ

1. Получены математические зависимости для расчета расстояния между режущими зернами лепесткового круга.

2. В результате численного моделирования установлены закономерности изменения локальных температур и температур в поверхностном слое заготовки в зависимости от номера последовательно работающего зерна и расстояния между зернами.

3. При увеличении расстояния между зернами от 0,97 до 4 мм температуры заготовки на расстоянии от ее поверхности 1,5, 13,8 и 67 мкм уменьшаются на 23,2, 23 и 11 % соответственно.

4. При увеличении расстояния между зернами от 0,97 до 4 мм температуры в зонах контакта зерна со стружкой и заготовкой снижаются на 12%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубровский, П.В. Шлифование титановых сплавов лепестковыми кругами / П.В. Дубровский. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 100 с.
2. Унянин, А.Н. Аналитическое исследование сил шлифования лепестковыми кругами / А.Н. Унянин, А.Д. Евстигнеев // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий [Электронный ресурс] : сб. тр. науч. семинара; Донской гос. техн. ун-та. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. – С. 268 – 274.
3. Do Duc Trung. Calculating Cutting Force in Grinding, THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIAL, MACHINES AND METHODS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2018.
4. Гдалевич, А.И. Полирование деталей лепестковыми кругами / А.И. Гдалевич, С.И. Житницкий, В.И. Хрычев и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 80 с.
5. Унянин, А.Н. Исследование влияния амплитуды ультразвуковых колебаний на температурное поле при шлифовании кругами из эльбора / А.Н. Унянин, Н.Е. Сарайнов // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. – 2017. – №9 (204). – С. 109 – 111.
6. Unyanin, A. The ultrasonic grinding process temperature field study / A. Unyanin, A. Khusainov // MATEC Web Conferences. – Vol. 129. – 2017.
7. Худобин, Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.
8. Вerezub, В.Н. Шлифование абразивными лентами / В.Н. Вerezub. – М.: Машиностроение, 1972. – 103 с.

INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE FIELD DURING GRINDING WITH FLAP WHEELS

© 2022 A.N. Unyanin, V.S. Chistyakov

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Mathematical dependences for calculating the distance between the cutting grains of the flap wheel are given. Numerical simulation of the temperature field that occurs in the process of grinding workpieces with flap wheels of workpieces made of alloy D16 has been performed. The temperature field was fixed by changing the number of successively working abrasive grains and by varying the distance between the grains. Regularities have been established for changing the power of heat sources, local temperatures and temperatures in the surface layer of the workpiece, depending on the number of consecutively working grains and the distance between abrasive grains.

Keywords: grinding, temperature, numerical simulation, flap wheel

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-2-27-32

REFERENCES

1. Dubrovskij, P.V. Shlifovanie titanovykh spлавov лепестковыми кругами / P.V. Dubrovskij. – Ulyanovsk: UIGTU, 2000. – 100 s.
2. Unyanin, A.N. Analiticheskoe issledovanie sil shlifovaniya лепестковыми кругами / A.N. Unyanin, A.D. Evstigneev // Perspektivnye napravleniya razvitiya otdelochno-

- uprochnyayushchej obrabotki i vibrovolnovykh tekhnologij [Elektronnyj resurs] : sb. tr. nauch. seminara; Donskoj gos. tekhn. un-t. – Elektron. tekstovye dan. – Rostov-na-Donu : DGTU, 2020. – S. 268 – 274.
3. Do Duc Trung. Calculating Cutting Force in Grinding, THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIAL, MACHINES AND METHODS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2018.
 4. Gdalevich, A.I. Polirovanie detalej lepestkovymi krugami / A.I. Gdalevich, S.I. ZHitnickij, V.I. Hrychev i dr. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 80 s.
 5. Unyanin, A.N. Issledovanie vliyaniya amplitudy ul'trazvukovykh kolebanij na temperaturnoe pole pri shlifovanii krugami iz el'bora / A.N. Unyanin, N.E. Sarajnov // Izvestiya Volgogradskogo gos. tekhn. un-ta. – 2017. – № 9 (204). – S. 109 – 111.
 6. Unyanin, A. The ultrasonic grinding prozess temperature field study / A. Unyanin, A. Khusainov // MATEC Web Conferences. – Vol. 129. – 2017.
 7. Hudobin, L.V. Minimizaciya zasalivaniya shlifoval'nyh krugov / L.V. Hudobin, A.N. Unyanin. – Ul'yanovsk: UIGTU, 2007. – 298 s.
 8. Verezub, V.N. Shlifovanie abrazivnymi lentami / V.N. Verezub. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 103 s.