

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК КОМПОЗИЦИОННЫМИ КРУГАМИ**

© 2017

**Н.И. Веткасов**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»**О.Г. Крупеников**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»**С.И. Улитин**, аспирант кафедры «Технология машиностроения»*Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)*

**Ключевые слова:** плоское маятниковое шлифование; композиционный шлифовальный круг; плотность теплового потока; средняя контактная температура; смазочный элемент.

**Аннотация:** В настоящее время наиболее значительный резерв повышения технологической эффективности шлифования заключен в применении КШК. Однако КШК является более сложным по сравнению с ПШК и СК телом из-за наличия в нем СЭ, заполненных ТСМ с плотностью, отличной от плотности материала абразивной части круга. Проблемы и вопросы применения ПШК и СК при шлифовании достаточно глубоко исследованы, однако особенности конструкции КШК значительно усложняют или делают невозможным применение для описания процесса шлифования такими кругами методик и математических моделей, разработанных для СК и ПШК. В связи с этим проблеме математического моделирования теплофизики процесса шлифования КШК необходимо уделить значительное внимание. В статье предложена математическая модель тепловой напряженности плоского маятникового шлифования периферией КШК с конструктивными элементами в виде радиальных прорезей, заполненных твердым смазочным материалом. Данная модель позволяет оценить температурное поле на поверхности и внутри заготовки на протяжении полного рабочего трехэтапного цикла плоского маятникового шлифования, включающего подвод ШК до касания с заготовкой, шлифование с врезной подачей и выхаживание. Разработанная математическая модель основана на расчете тангенциальной составляющей  $P_z$  силы шлифования каждого хода шлифования и выхаживания. Это позволит определить плотность теплового потока, выделившегося в зоне контакта, и среднюю контактную температуру каждого прохода ШК. Объединение результатов расчета средней контактной температуры всех ходов шлифования и выхаживания позволит оценить температурное поле полного цикла шлифования и прогнозировать появление шлифовочных дефектов.

**ВВЕДЕНИЕ**

Шлифование в промышленности распространено как метод высокопроизводительной предварительной и окончательной обработки заготовок из различных материалов, имеющих различную твердость. Однако шлифование нередко сопровождается появлением микротрещин и шлифовочных прижогов на обработанных поверхностях деталей машин, что недопустимо при высоких требованиях современного машиностроения к выходным параметрам механической обработки (точность, качество поверхностного слоя и др.) [1; 2].

Применение прерывистых шлифовальных кругов (ПШК) значительно снижает вероятность появления прижогов и растягивающих напряжений в поверхностном слое шлифованных деталей. Вопросы применения ПШК достаточно широко отражены в работах [3–5]. Однако применение ПШК сдерживается в силу ряда их недостатков, наиболее существенным из которых является необходимость сложных прочностных расчетов.

В настоящее время наиболее перспективным направлением устранения шлифовочных дефектов является применение на операциях шлифования композиционных шлифовальных кругов (КШК), которые представляют собой ПШК, конструктивные элементы которого заполнены твердым смазочным материалом (ТСМ). КШК, в силу особенностей своей конструкции, позволяют [6]: 1) осуществлять гарантированную подачу смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) непосредственно в зону шлифования и усиливать благодаря этому смазочное действие внешней среды; 2) понизить температуру в зоне контакта за счет отвода доли тепла в материал СЭ при его расплавлении

в процессе шлифования; 3) повысить по сравнению с ПШК динамическую устойчивость процесса шлифования; 4) использовать для обеспечения моющего и охлаждающего действий внешней среды простейшие практически безвредные СОТС на водной основе.

Для гарантированного устранения микротрещин и прижогов на обработанной поверхности необходимо установить среднюю контактную температуру цикла шлифования, что позволит прогнозировать возникновение шлифовочных дефектов на детали [7]. Таким образом, целью работы является разработка математической модели теплонапряженности полного цикла шлифования КШК, которая позволит оценить температурное поле в зоне контакта «шлифовальный круг – заготовка» на всем цикле и каждом ходе шлифования и выхаживания по отдельности.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В данной статье авторы решали задачу разработки математической модели теплонапряженности цикла плоского маятникового шлифования периферией КШК, ПШК или стандартного круга (СК). При этом рассмотрен трехэтапный цикл плоского маятникового шлифования, который состоит из этапа (I) быстрого подвода круга до момента касания с обрабатываемой поверхностью заготовки и рабочего цикла, включающего шлифование (II) и выхаживания (III) (рис. 1). Длина рабочего хода шлифовального круга складывается из длины заготовки, врезания и перебега [8].

Решение поставленной теплофизической задачи при шлифовании КШК выполняли методом источников, который рассмотрен в работах [9–11]. Итоговая

математическая модель для оценки температурного поля в заготовке при шлифовании ее СК, ПШК и КШК имеет следующий вид [12–15]:

$$\begin{aligned}
 T(x, \tau) = & \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \times \\
 & \times \sum_{k=0}^n \int_{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k, 0, \text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \tau, t_c \cdot k + t_k))}^{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k, 0, t_c \cdot k)} \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \times \\
 & \times \operatorname{erf}\left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}\right) \times \\
 & \times \left[ 1 - \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \times \right. \\
 & \times \left[ 1 - \operatorname{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right] + \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)} \right] \times \right. \\
 & \times \exp\left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} + \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right]^2 \right] dt
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, мм<sup>2</sup>/с [16];  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала заготовки, Дж/(мм·с·°С);  
 $k$  – номер цикла нагрева – охлаждения;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи ( $\alpha_1$  – во время контакта круга с заготовкой,  $\alpha$  – в отсутствие контакта), Дж/(мм<sup>2</sup>·с·°С);  
 $x$  – глубина измерения температуры слоя, мм;  
 $h$  – значение, равное половине высоты шлифовального круга (ШК), мм;  
 $t_c$  – время цикла нагрева – охлаждения заготовки, с:

$$t_c = \frac{\delta + \delta_1}{V_k},$$

где  $\delta, \delta_1$  – величины дуги соответственно режущего выступа и смазочного элемента (СЭ) КШК (впадины ПШК) по периферии, мм;  $V_k$  – окружная скорость круга, м/с;  
 $t_k$  – время контакта, с:

$$t_k = \frac{\delta}{V_k};$$

$q$  – плотность теплового потока, выделившегося в зоне контакта, Дж/(мм<sup>2</sup>·с):

$$q = \frac{P_z \cdot V_k}{S},$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы шлифования [13; 17], Н;  $S$  – площадь контакта ШК с заготовкой, м<sup>2</sup>.

Количество циклов нагрева охлаждения за 1 ход шлифования [18]:

$$n = \frac{T_1}{t_c},$$

где  $T_1$  – время 1 хода шлифования, с:

$$T_1 = \frac{l_3}{V_3},$$

где  $l_3$  – длина заготовки, мм;

$V_3$  – скорость продольной подачи заготовки, мм/мин.

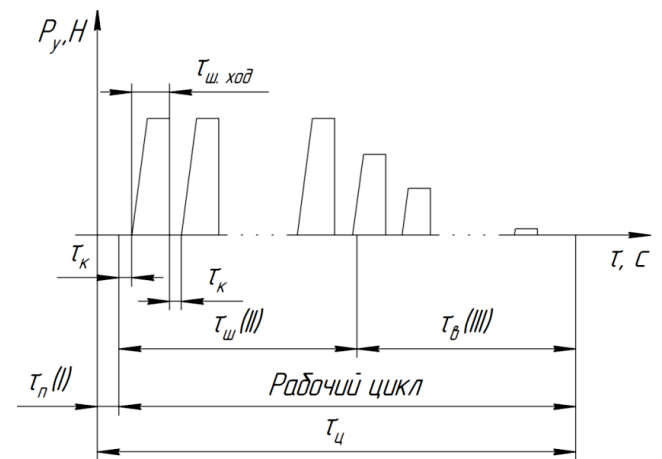


Рис. 1. Трехэтапный цикл

плоского маятникового шлифования [8]:

- $\tau_n(II)$  – время подвода круга к заготовке со скоростью, превышающей скорость рабочей подачи, с;
- $\tau_{ш}(II)$  – время шлифования с врезной подачей, с;
- $\tau_b(III)$  – время выхаживания, с;
- $\tau_c$  – полное время цикла, с

Математическое моделирование выполнено в широко применяемом математическом пакете программ Mathcad. На рис. 2–4 представлены результаты моделирования теплонапряженности цикла плоского маятникового шлифования заготовок из стали 45, HRC 42...45.

Исходные данные:

- 1) шлифовальный круг (ШК) – 1-250\*20\*76 24A F80K 7 V;
- 2) число прорезей (ПШК, КШК) – 12 шт.;
- 3) длина прорезей по периферии (ПШК, КШК) – 12 мм;
- 4) режимы шлифования [19]:  $V_k=35$  м/с;  $V_3=8$  м/мин; глубина шлифования  $t=0,01$  мм (врезная подача  $S_{вп}=0,001$  мм/дв.ход);
- 5) материал СЭ КШК [20; 21] – фенолалкиды + дисульфид молибдена.

В нашем случае число ходов шлифования с врезной подачей  $-n_{ш}=20$ , так как условно принимаем, что врезная подача на двойной ход заготовки  $S_{2х}$  составляет десятую часть припуска  $Z$ , снимаемого при шлифовании:  $S_{2х}=0,1Z$ . Для уменьшения трудоемкости и времени расчета цикла шлифования в пакете Mathcad приняли длины заготовки, врезания и перебега равными по 1 мм.

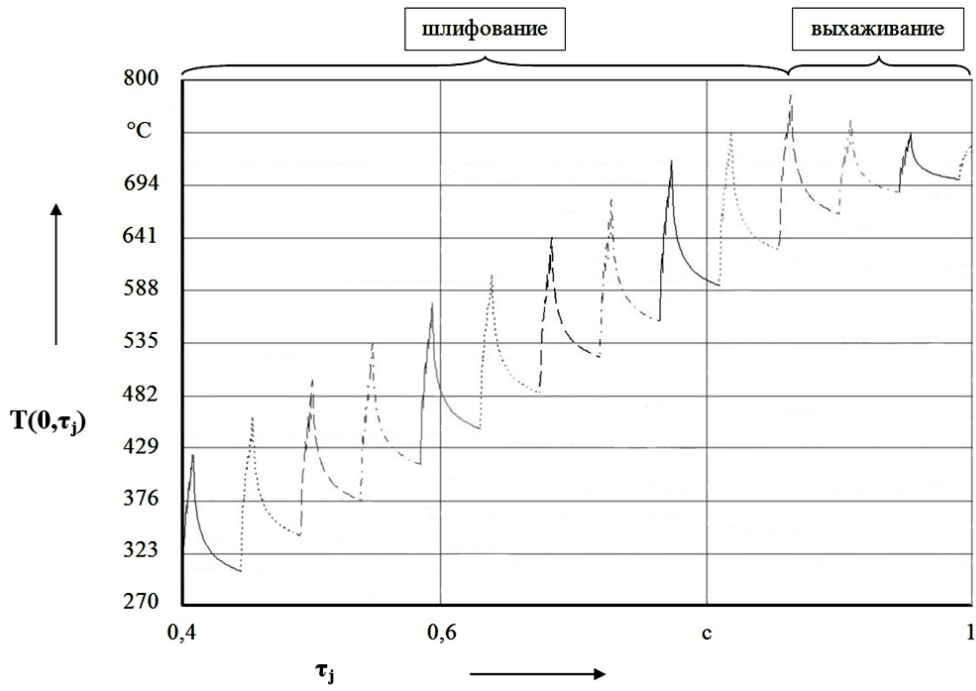


Рис. 2. Изменение средней контактной температуры цикла плоского маятникового шлифования (начиная с 10-го хода шлифования) ПШК в зависимости от числа ходов шлифования и выхаживания

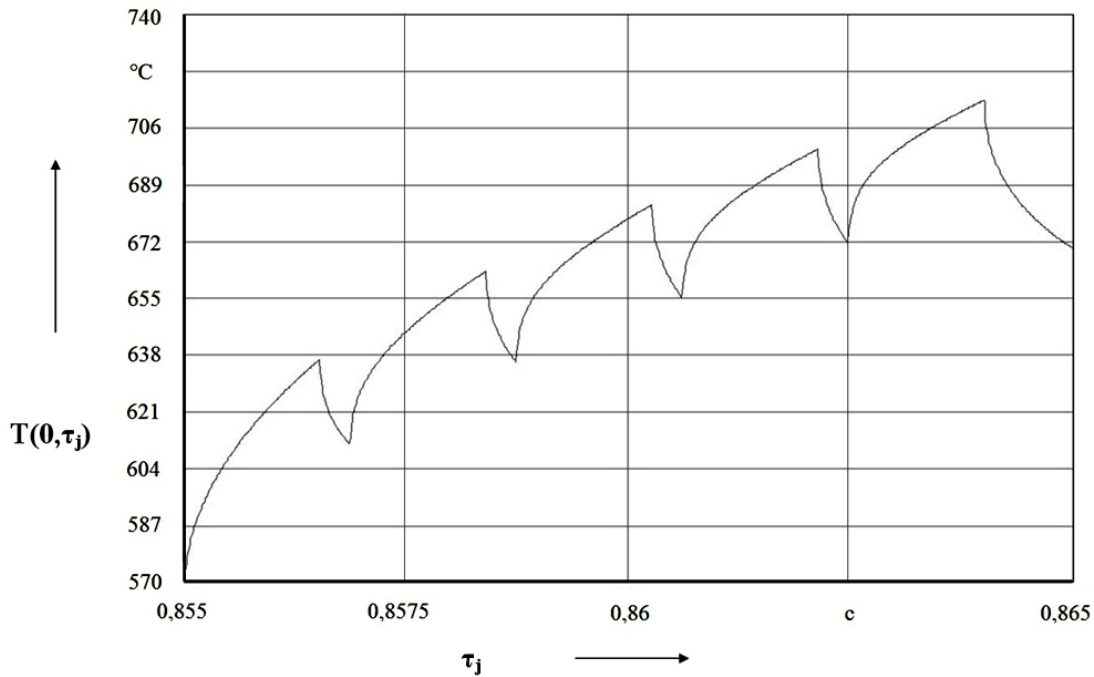


Рис. 3. Изменение средней контактной температуры хода шлифования КШК (20-й ход шлифования) в зависимости от числа циклов нагрева – охлаждения

На основании методики, представленной в [12; 13], и разработанной компьютерной программы выполнен расчет тангенциальной составляющей  $P_z$  силы шлифования на каждом ходе шлифования и выхаживания. Это позволило определить плотность теплового потока, выделившегося в зоне контакта, и среднюю контактную температуру каждого прохода ШК и в резуль-

тате оценить температурное поле полного цикла шлифования.

На рис. 3, 4 видно, что один проход ШК представляет собой последовательность коротких циклов нагрева – охлаждения, при этом возрастание температуры в зоне контакта во время работы режущего выступа чередуется с ее снижением при прохождении через дугу

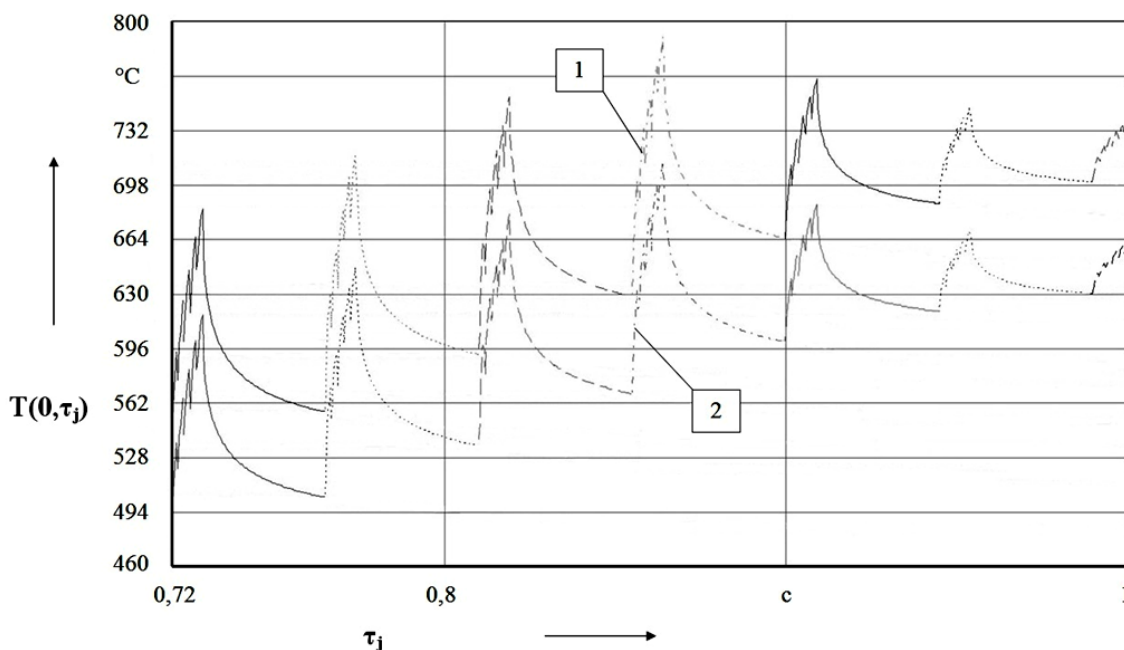


Рис. 4. Сравнение теплонапряженности циклов шлифования ПШК и КШК при переходе на выхаживание: 1, 2 – соответственно ПШК и КШК

контакта прорези ПШК или СЭ КШК. Последовательность данных циклов ходов ШК является частью общего цикла нагрева – охлаждения (см. рис. 2, 4), проводимого до достижения требуемых выходных параметров обработки. Из рис. 3 видно, что средняя контактная температура полного цикла шлифования КШК при заданных исходных данных достигает максимального значения  $\sim 800$  °С.

Из рис. 4 видно, что теплонапряженность цикла шлифования КШК ниже по сравнению с ПШК приблизительно на 12 %. Для более значительного снижения средней контактной температуры при шлифовании КШК и достижения максимальной технологической эффективности процесса шлифования такими кругами необходимо научно обоснованно подходить к выбору сочетания конструкции КШК и материала его СЭ.

В настоящее время авторы занимаются доработкой, оптимизацией и экспериментальным подтверждением представленной математической модели с целью получения возможности выполнения оперативных расчетов в пакете Mathcad с входными данными процесса шлифования, применяемыми на производстве.

## ВЫВОДЫ

1. Существует значительный резерв повышения технологической эффективности операции шлифования за счет применения КШК.

2. Математическая модель (1) позволяет оценить температурное поле полного цикла шлифования СК, ПШК и КШК с учетом конструкции круга, режимов шлифования и физико-механических свойств обрабатываемого материала и состава ТСМ.

3. Результаты расчета по представленной методике позволяют установить максимальное значение средней контактной температуры на всем цикле шлифования

и прогнозировать появления шлифовочных дефектов на обработанной поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
3. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
4. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. Киев: Вища шк., 1986. 174 с.
5. Якимов А.В., Ткаченко В.О., Зимин С.Г., Якимов А.А., Новиков Ф.В., Новиков Г.В. Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании. Одесса: ОГПУ, 1998. 272 с.
6. Худобин Л.В., Веткасов Н.И. Шлифование композиционными кругами. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 256 с.
7. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 144 с.
8. Армер А.И. Повышение эффективности плоского маятникового шлифования путем ускоренного выхаживания с применением устройств для микроподдачи заготовок : дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2002. 208 с.
9. Komanduri R., Hou Z.B. Thermal modeling of the metal cutting process – Part II: Temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool-chip interface // International journal of Mechanical Sciences. 2001. Vol. 43. № 1. P. 57–88.
10. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat in solids. Oxford: Oxford University Press, 1959. 510 p.
11. Jaeger J.C. Moving sources of heat and temperature at sliding contact // Journal and Proceeding of the Royal Society of NSW. 1942. Vol. 76. P. 203–224.

12. Веткасов Н.И., Крупенников О.Г., Улитин С.И. Исследование процесса шлифования композиционными кругами // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Севастополь: Севастопольск. гос. ун-т, 2015. С. 15–22.
13. Веткасов Н.И., Крупенников О.Г., Улитин С.И., Мотлях Е.С. Моделирование силовой напряженности процесса плоского шлифования композиционными кругами // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 2. С. 19–27.
14. Крупенников О.Г., Улитин С.И. Разработка математической модели силовой напряженности процесса шлифования заготовок абразивными кругами // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. науч. тр. I междунар. заоч. науч.-техн. конф. Челябинск: ЮУрГУ, 2014. С. 551–555.
15. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Математическое моделирование температурного поля в шлифуемой заготовке периферией круга // Восточноевропейский журнал передовых технологий. 2004. № 2. С. 52–63.
16. Бобровский Н.М., Вильчик В.А., Бокк В.В., Бобровский И.Н. Распределение температур при выглаживании широким самоустанавливающимся инструментом // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. 2008. № S6. С. 22–29.
17. Унянин А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов : дис. ... д-ра техн. наук. Ульяновск, 2006. 503 с.
18. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 208 с.
19. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1970. 320 с.
20. Мельников В.Г., Аль-Сабти Х.А. Исследование триботехнических свойств пластичных смазочных материалов, наполненных порошками твердых смазок // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2007. № 4. С. 62–67.
21. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием / под ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
22. Khudobin L.V., Vetkasov N.I. *Shlifovaniye kompozitsionnymi krugami* [Grinding by composite wheels]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2004. 256 p.
23. Ostrovsky V.I. *Teoreticheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Theoretical bases of process of grinding]. Leningrad, LGU Publ., 1981. 144 p.
24. Armer A.I. *Povysheniye effektivnosti ploskogo mayatnikovogo shlifovaniya putem uskorennoy vykhazhivaniya s primeneniem ustroystv dlya mikropodachi zagotovok*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increase in efficiency of flat pendular grinding by the accelerated nursing using devices for microgiving of workpieces]. Ulyanovsk, 2002. 208 p.
25. Komanduri R., Hou Z.B. Thermal modeling of the metal cutting process – Part II: Temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool-chip interface. *International journal of Mechanical Sciences*, 2001, vol. 43, no. 1, pp. 57–88.
26. Carslow H.S., Jaeger J.C. *Conduction of heat in solids*. Oxford, Oxford University Press, 1959. 510 p.
27. Jaeger J.C. Moving sources of heat and temperature at sliding contact. *Journal and Proceeding of the Royal Society of NSW*, 1942, vol. 76, pp. 203–224.
28. Vetkasov N.I., Krupennikov O.G., Ulitin S.I. Study of the grinding process by composite wheels. *Materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Sovremennye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyeni"*. Sevastopol, Sevastopolskiy gos. universitet Publ., 2015, pp. 15–22.
29. Vetkasov N.I., Krupennikov O.G., Ulitin S.I., Motlyakh Y.S. Modeling of power tension surface grinding composite community. *Fundamentalnye i prikladnye problem tekhniki i tekhnologii*, 2016, no.2, pp. 19–27.
30. Krupennikov O.G., Ulitin S.I. Development of mathematical model of power intensity of process of grinding of procurements by abrasive wheels. *Sbornik nauch. trudov I mezhdunar. zaoch. nauch.-tekhn. konf. "Tekhnologicheskoe obespechenie mashinostroyitelnykh proizvodstv"*. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2014, pp. 551–555.
31. Sizyy Yu.A., Stepanov M.S. Mathematical modeling of the temperature field in the ground procurement by the periphery of a wheel. *Vostochnoevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2004, no. 2, pp. 52–63.
32. Bobrovsky N.M., Vilchik V.A., Bokk V.V., Bobrovsky I.N. Distribution of temperature in burnishing with broad self-aligned gear. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk*, 2008, no. S6, pp. 22–29.
33. Unyanin A.N. *Nauchnoe i tekhnologicheskoe obespechenie shlifovaniya zagotovok i zplastichnykh staley i splavov s predotvrashcheniyem zasalivaniya abrazivnykh krugov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific and technological support of grinding of procurements from plastic steels and alloys with prevention of a brining of abrasive wheels]. Ulyanovsk, 2006. 503 p.
34. Korchak S.N. *Proizvoditelnost protsessa shlifovaniya stalnykh detaley* [Productivity of process of grinding of steel details]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 208 p.

## REFERENCES

1. Reznikov A.N. *Teplofizika rezaniya* [Cutting thermophysics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 288 p.
2. Sipaylov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes in grinding and the control of surface quality]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 167 p.
3. Yakimov A.V. *Optimizatsiya protsessa shlifovaniya* [Grinding process optimization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 176 p.
4. Yakimov A.V. *Preryvistoe shlifovanie* [Faltering grinding]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1986. 174p.
5. Yakimov A.V., Tkachenko V.O., Zimin S.G., Yakimov A.A., Novikov F.V., Novikov G.V. *Teplovye protsessy pri obychnom i preryvistom shlifovanii* [Thermal pro-

19. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of grinding materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 320 p.
20. Melnikov V.G., Alsabti H.A. Investigation of tribotechnical characterization of lubricating materials with the powdered additives. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie*, 2007, no. 4, pp. 62–67.
21. Khudobin L.V., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primenenie pri obrabotke rezaniem* [Lubricating-cooling process means and their application during cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.

#### MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL STRESS PROCESS OF FLAT GRINDING OF WORKPIECES USING COMPOSITE WHEELS

© 2017

**N.I. Vetkasov**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair “Mechanical engineering”

**O.G. Krupennikov**, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Mechanical engineering”

**S.I. Ulitin**, postgraduate student of Chair “Mechanical engineering”

*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)*

**Keywords:** flat pendulum grinding; composite grinding wheel; heat flow density; average contact temperature; lubricating element.

**Abstract:** Currently, the most significant reserve for improvement of grinding technological efficiency involves the application of the composite grinding wheels (CGW). However, the CGW is more complicated body comparing with the intermittent (IGW) and standard (SGW) grinding wheels due to the presence of lubricating elements (LE) filled with the solid lubricating material (SLM) with a density different from the density of the material of the wheel abrasive part. The problems and issues of IGW and SGW application when grinding are thoroughly studied, however, the CGW design features make it more difficult or impossible to apply the techniques and mathematical models developed for the SGW and the IGW to describe grinding process. In this regard, it is necessary to pay special attention to the problem of mathematical modeling of thermal physics of the grinding process using the CGW. The paper suggests the mathematical model of thermal stress of flat pendulum grinding by the periphery of CGW with the structural elements in the form of radial slits filled with the solid lubricant. This model allows estimating the temperature field on the surface and inside the workpiece throughout the full working three-stage cycle of flat pendulum grinding including the forward motion of grinding wheel to touch with the workpiece and grinding with inward movement and sparkling-out. The developed mathematical model is based on the calculation of the  $P_z$  tangential component of grinding force of each travel of grinding and sparkling-out. This will allow determining the density of heat flow emitted in the contact zone, and the average contact temperature of each travel of GW. The combination of the results of calculation of average contact temperature of all travels of grinding and sparkling-out will allow assessing the temperature field of the full cycle of grinding and predicting the occurrence of grinding defects.