

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ШЛИФОВАНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2015

*А.Н. Унянин*, доктор технических наук, доцент

*Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)*

**Ключевые слова:** шлифование; ультразвуковые колебания; температурное поле; локальная температура; моделирование температурного поля при шлифовании.

**Аннотация:** Перспективным направлением повышения эффективности процесса шлифования является использование энергии ультразвуковых колебаний. Для оценки условий работы шлифовального круга и параметров качества поверхностного слоя заготовки необходимо знать локальные температуры. Однако аналитическое исследование локальных температур при шлифовании с ультразвуковыми колебаниями не выполнено.

Целью исследований является установление влияния параметров колебаний на температурное поле процесса шлифования.

Задачи исследования: разработка физических и математических моделей для расчета температурного поля, методики, алгоритма и программного обеспечения для расчета температур, выполнение численного моделирования температур.

Научная новизна: впервые аналитическим путем выполнено исследование температурного поля при шлифовании с ультразвуковыми колебаниями.

Разработаны физические и математические модели для расчета температурного поля при шлифовании, учитывающие изменение кинематики микрорезания абразивными зёрнами и механических характеристик материала заготовки при наложении ультразвуковых колебаний, а также зависимости параметров, характеризующих сопротивление материала заготовки диспергированию и теплофизических свойств материалов взаимодействующих объектов (абразивного зёрна, заготовки, стружки, внешней среды), от температуры. Моделирование выполнено на основе совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, записанных для каждого из взаимодействующих объектов. Для расчета уравнений использован метод конечных элементов. Разработана методика и программное обеспечение для расчета температурного поля. Приведены результаты численного моделирования температур при малых амплитудах колебаний, незначительно изменяющих кинематику микрорезания. При наложении ультразвуковых колебаний температура заготовки оказалась ниже на 10 %, а локальные температуры в зоне контакта абразивного зёрна с заготовкой и со стружкой – на 14 % и 15 % соответственно.

Повышение работоспособности круга и улучшение качества обработанных деталей при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) во многом связано с изменением тепловой напряженности этого процесса [1–3]. Однако аналитическое исследование температурного поля при шлифовании с УЗК не выполнено.

Тепловые процессы при шлифовании изучены достаточно полно [4–6], однако в большинстве аналитических исследований зона контакта шлифовального круга с заготовкой представляет сплошной тепловой источник и рассчитываются средние контактные температуры. Для оценки условий работы шлифовального круга и параметров качества тонкого поверхностного слоя шлифуемой заготовки необходимо знать локальные температуры [7–9].

В наших исследованиях приняты во внимание тепловыделения в зоне деформирования *DE* абразивным зерном (*A3*) материала заготовки и в зонах контакта *A3* со стружкой *NE* и заготовкой *EV* (плотности источников тепловыделения  $q_{\partial}$ ,  $q_{1T}$ ,  $q_{2T}$  соответственно) (рис. 1). Полагали, что источник плотностью  $q_{\partial}$  распределен равномерно, а источники плотностью  $q_{1T}$  и  $q_{2T}$  – по несимметричному нормальному и экспоненциальному закону соответственно [9–11]. Составляющие силы микрорезания, мощности и плотности источников тепловыделения рассчитывали по аналитическим зависимостям [10]. Например, плотность тепловыделения в зоне контакта *A3* с заготовкой на расстоянии  $x_3$  от точки *E* (см. рис. 1) можно вычислить, как:

$$q_{2T}(x_3) = q_{2T} \cdot \exp[-k_0 \cdot x_3];$$

$$q_{2T} = \frac{W_{2T} \cdot k_0}{l_2 \cdot \exp[-k_0 \cdot l_2]}$$

$$W_{2T} = \frac{\mu_0 \cdot \tau_s \cdot f_{тр} \cdot V_{кр}}{3 \cdot \mu_s},$$

где  $k_0$  – коэффициент,  $m^{-1}$ ;  
 $f_{тр}$  – площадь поверхности трения *A3* о заготовку,  $m^2$ ;  
 $\mu_s$  – коэффициент внутреннего трения [12];  
 $l_2$  – размер площадки затупления на *A3*,  $m$ ;  
 $\tau_s$  – напряжения сдвига,  $Pa$  [12–14];  
 $\mu_0$  – коэффициент трения *A3* о заготовку;  
 $V_{кр}$  – рабочая скорость круга,  $m/c$ ;  
 $W_{2T}$  – мощность тепловыделения,  $Вт$ .

Абразивное зерно представили в виде усеченной пирамиды, стружку и заготовку – в виде прямоугольных параллелепипедов [5; 9]. Для повышения достоверности результатов учтены зависимости параметров, характеризующих сопротивление материала заготовки диспергированию [14; 15], а также теплофизических свойств всех взаимодействующих объектов (в том числе внешней среды), от температуры. Моделирование выполнили на основе совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, записанных для каждого из взаимодействующих объектов и учитывающих скорости их относительно-

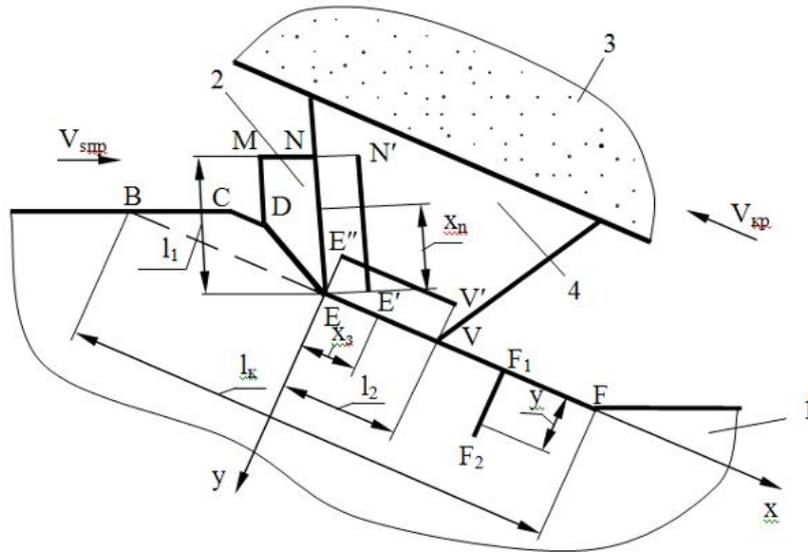


Рис. 1. Схема к расчету теплообмена в зоне контакта режущего АЗ с заготовкой:  
1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – шлифовальный круг; 4 – абразивное зерно

го перемещения (АЗ относительно заготовки и стружки относительно АЗ).

Чтобы учесть формирование температурного поля как результат наложения тепловых импульсов от отдельных АЗ, моделировали перемещение (см. рис. 1) ряда последовательно вступающих в контакт с заготовкой зерен.

При плоском шлифовании без наложения УЗК изменение глубины внедрения режущего АЗ в материал заготовки по длине  $l$  дуги контакта:

$$a_3(l) = a_{кр} + A \cdot l,$$

где  $a_{кр}$  – критическая глубина микрорезания, м;  
 $A$  – коэффициент [10].

При колебании частиц материала заготовки в направлении  $y$ , перпендикулярном обрабатываемой по-

верхности (рис. 2), глубину внедрения режущего АЗ можно представить, как:

$$a_{31}(l) = a_3(l) + A_y \cdot \sin(\omega \frac{l}{V_{кр}} + \varphi),$$

где  $A_y$  – амплитуда колебания заготовки в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, м;  
 $\omega$  – циклическая (круговая) частота колебаний, рад/с;  
 $\varphi$  – фаза УЗК, град.

Колебание заготовки с ультразвуковой частотой приводит к качественному изменению процесса диспергирования ее материала абразивными зёрнами шлифовального круга. Наложение УЗК сопровождается уменьшением пределов прочности и текучести материала заготовки, а также его способности к упрочнению в процессе деформации [1; 16].

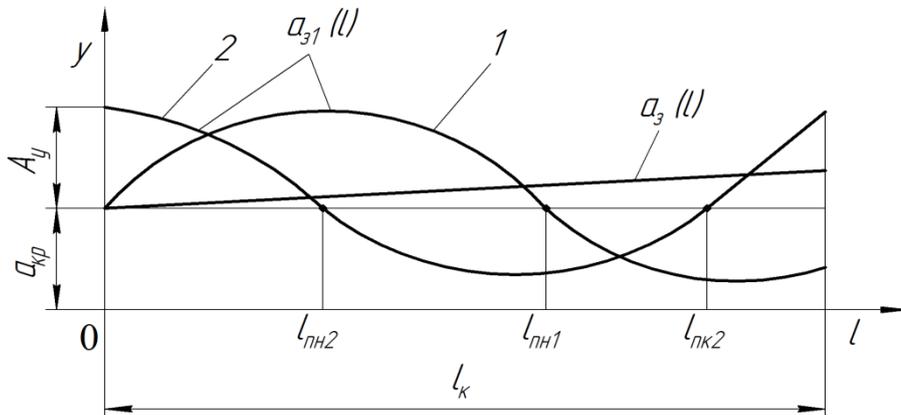


Рис. 2. Схема к расчету глубины внедрения режущего зерна в заготовку: 1 – фаза УЗК  $\varphi=0^\circ$ ;  
2 –  $\varphi=90^\circ$  (на дуге траектории контакта зерна с заготовкой укладывается менее одной волны УЗК)

Таблица 1. Результаты расчета температур

Способ шлифования	Средняя температура заготовки $T_1$ , К		Средняя локальная температура на площадке контакта	
	на глубине 10 мкм	на глубине 50 мкм	А3 с заготовкой $T_2$ , К	А3 со стружкой $T_2'$ , К
Без наложения УЗК	1218	1066	2535	2179
С наложением УЗК	1097	960	2181	1852

Средние по плоскости сдвига касательные напряжения, определяющие силу микрорезания единичными зернами круга:

$$\tau_s = \frac{\sigma_{иш}}{\sqrt{3}},$$

где  $\sigma_{иш}$  – интенсивность напряжений при скорости и температуре деформации процесса шлифования, Па [14], которую можно определить по зависимости, предложенной в работе [17]:

$$\sigma_{иш} = \sigma_B \cdot 1,558 \cdot e^{2,34 \cdot 10^{-3} \cdot T},$$

где  $\sigma_B$  – временное сопротивление материала заготовки, Па;  
 $T$  – температура деформации, К. Наложение на заготовку УЗК приводит к изменению временного сопротивления ее материала, которое становится равным

$$\sigma_B^1 = k_\sigma \cdot \sigma_B,$$

где  $k_\sigma$  – коэффициент, показывающий степень уменьшения временного сопротивления  $\sigma_B$  при наложении колебаний [1; 16]. Поскольку этот коэффициент меньше единицы, то можно прогнозировать снижение силы микрорезания и температуры за счет уменьшения  $\tau_s$ .

Для расчета дифференциальных уравнений теплопроводности использовали метод конечных элементов [18]. Методика численного расчета на основе дискретных аналогов уравнений теплопроводности реализована в оригинальных программах.

Адекватность физических и математических моделей, принятых при расчете температур, реальным условиям проверяли путем сравнения экспериментальных значений средней контактной температуры в зоне шлифования заготовок из сталей 40Х и 30Х13, измеренной полусинтетической термпарой, в наших исследованиях и локальной температуры, зафиксированной Г.В. Бокучавой при микрорезании заготовок из стали 40 и твердого сплава ВТ14, с расчетными значениями [10; 11; 19]. Расхождения между расчетными и экспериментальными значениями не превышают 15 %, что свидетельствует о возможности использования метода для теплофизического анализа процесса шлифования.

Численное моделирование температур выполнили при следующих исходных данных: плоское многопроходное шлифование периферией круга; материал заготовки – сталь 40Х; материал АЗ шлифовального круга – электрокорунд нормальный; зернистость – F60 (25-я); рабочая скорость круга  $V_{кр}=35$  м/с; скорость продольной подачи  $V_{s,пр}=10$  м/мин; глубина шлифования  $t=0,01$  мм.

Моделировали наложение на заготовку УЗК частотой 18600 Гц с различной амплитудой. Фиксировали локальные температуры  $T_2$  на площадке контакта АЗ с заготовкой и площадке АЗ со стружкой  $T_2'$ , а также температуру  $T_1$  в поверхностных слоях заготовки на глубине 10 и 50 мкм в сечении, расположенном в середине дуги контакта АЗ с заготовкой (линия  $F_1 F_2$  на рис. 1).

Наложение УЗК приводит к снижению температур как при движении через зону шлифования первых зерен, когда температура деформируемого материала заготовки относительно невелика, так и зерен, деформирующих заготовку, нагретую до 800 ... 1000 К.

При работе первого АЗ с амплитудой  $A_y$ , равной 1 мкм, температура  $T_2$  оказалась ниже на 8 ... 9 %, а  $T_2'$  на 8 ... 13 %, чем без наложения УЗК ( $A_y=0$ ). При увеличении  $A_y$  до 2 мкм температуры снизились в большей степени:  $T_2$  на 9 ... 14 %, а  $T_2'$  на 17 ... 31 %. Локальные температуры существенно зависят от фазы УЗК и принимают минимальное значение при фазе  $\varphi$ , равной  $180^\circ$ , при которой длина траектории, на которой АЗ осуществляет микрорезание, минимальна. Максимальные температуры зафиксированы при  $\varphi=0^\circ$ , при которой длина траектории микрорезания имеет максимальное значение (см. рис. 2).

Результаты численного моделирования при работе 18-го АЗ, деформирующего прогретую заготовку ( $A_y=0,5$  мкм), представлены в табл. 1.

При наложении УЗК температура заготовки оказалась ниже на 10 %, а локальные температуры в зоне контакта АЗ с заготовкой и со стружкой – на 14 % и 15 % соответственно.

При наложении колебаний, имеющих относительно малую амплитуду, изменение кинематики микрорезания практически не влияет на температурное поле. Основной причиной уменьшения температур при наложении УЗК является уменьшение касательных напряжений  $\tau_s$ , определяющих силу микрорезания единичными зернами круга, которая при обработке с УЗК снижается [1; 16; 20]. При больших амплитудах УЗК на локальные температуры влияет также изменение кинематики микрорезания, причем в большей степени на температуру  $T_2$ .

В результате разработаны физические и математические модели для расчета температурного поля при шлифовании, позволяющие учесть изменение кинематики микрорезания абразивными зернами и механических характеристик материала заготовки при наложении УЗК. Приведены результаты численного моделирования температур при малых амплитудах колебаний, незначительно изменяющих кинематику микрорезания.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект 14-08-01059).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин [и др.]. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
2. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
3. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепло-массопереноса. М.: РАН, 2008. 250 с.
4. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. 128 с.
5. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
6. Ящерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.П. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1974. 210 с.
7. Унянин А.Н. Исследование режущей способности шлифовального круга при обработке пластичных материалов // СТИН. 2006. № 1. С. 28–32.
8. Унянин А.Н. Влияние локальных температур на налипание материала заготовки на абразивные зерна // СТИН. 2008. № 6. С. 26–31.
9. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
10. Унянин А.Н. Аналитическое исследование локальных температур при шлифовании // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 6. С. 41–50.
11. Унянин А.Н. Численное моделирование локальных температур при шлифовании // СТИН. 2006. № 8. С. 27–33.
12. Ефимов В.В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1992. 132 с.
13. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. М.-Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1973. 136 с.
14. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
15. Дьяконов А.А. Теплофизическая модель заготовки от действия единичного теплового источника – абразивного зерна // Известия вузов. Машиностроение. 2007. № 7. С. 60–62.
16. Штриков Б.Л., Малкина И.В. Влияние ультразвука на характер пластической деформации материалов при обработке клепаных соединений // Высокие технологии в машиностроении: материалы междунар. НТК. Самара: СГТУ, 2005. С. 140–142.
17. Носенко В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов. М.: Машиностроение, 2000. 262 с.
18. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. М.: Мир, 1988. 544 с.
19. Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. 238 с.
20. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.

## REFERENCES

1. Volgin M.F. et al. *Primenenie ultrazvuka i vzriva pri obrabotke i sborke* [Application of ultrasonic vibrations and explosion when processing and assembling]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002, 264 p.
2. Kiselev E.S. *Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki ratsionalnim ispolzovaniem energii ultrazvukovogo polya* [Enhancement of the processes of mechanical processing by efficient use of ultrasonic field energy]. Ulyanovsk, UIGTU publ., 2003, 186 p.
3. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. *Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyakh kriticheskogo teplomassoperenosa* [Mechanical processing of blank parts in the circumstances of critical heat and mass transfer]. Moscow, RAN publ., 2008, 250 p.
4. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Fizicheskie osnovi protsessa shlifovaniya* [Basic physics of grinding process]. Saratov, Saratovsky universitet publ., 1978, 128 p.
5. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981, 279 p.
6. Yashcheritsin P.I., Tsokur A.K., Eremenko M.P. *Teplovie yavleniya pri shlifovanii i svoystva obrabotannikh poverkhnostey* [Heat phenomena when grinding and the properties of processed surfaces]. Minsk, Nauka i tekhnika publ., 1974, 210 p.
7. Unyanin A.N. Research of cutting facility of grinding wheel when processing plastic materials. *STIN*, 2006, no. 1, pp. 28–32.
8. Unyanin A.N. Influence of local temperatures on the sticking of the blank part material on the grinding grain. *STIN*, 2008, no. 6, pp. 26–31.
9. Reznikov A.N. *Teplovie protsessi v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990, 288 p.
10. Unyanin A.N. Local temperatures analytical research while grinding. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2006, no. 6, pp. 41–50.
11. Unyanin A.N. Numerical simulation of local temperatures while grinding. *STIN*, 2006, no. 8, pp. 27–33.
12. Efimov V.V. *Model protsessa shlifovaniya s primeneniem SOZh* [Model of the process of grinding using the coolants-lubricants]. Saratov, Saratovsky universitet publ., 1992, 132 p.
13. Filimonov L.N. *Stoykost shlifovalnikh krugov* [Grinding wheels life]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1973, 136 p.
14. Korchak S.N. *Proizvoditelnost protsessa shlifovaniya stalnikh detaley* [Rate of grinding process of steel parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974, 280 p.
15. Dyakonov A.A. Thermophysical model of blank part obtained from a single heat source – abrasive grain. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2007, no. 7, pp. 60–62.
16. Shtrikov B.L., Malkina I.V. Ultrasonic influence on the materials plastic deformation property when processing riveted joints. *Materiali mazhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Visokie tekhnologii v mashinostroenii"*. Samara, SGTU publ., 2005, pp. 140–142.

17. Nosenko V.A. *Shlifovanie adgezionno-aktivnikh metallov* [Grinding of adhesion- active metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000, 262 p.
18. Shi D. *Chislennie metodi v zadachakh teploobmena* [Numerical methods in the heat transfer issues]. Moscow, Mir publ., 1988, 544 p.
19. Bokuchava G.V. *Tribologiya protsessa shlifovaniya* [Grinding process tribology]. Tbilisi, Sabchata Sakartvelo publ., 1984, 238 p.
20. Kumabe D. *Vibratsionnoe rezanie* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 424 p.

#### THE STUDY OF TEMPERATURE FIELD WHEN GRINDING WITH ULTRASONIC ACTIVATION

© 2015

*A.N. Unyanin*, Doctor of Engineering, Associate Professor  
*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)*

*Keywords:* grinding; ultrasonic vibrations; temperature field; local temperature; simulation.

*Abstract:* The application of ultrasonic vibrations power is the promising direction of the grinding process efficiency improvement. To estimate the work conditions of grinding wheel and the quality parameters of the surface layer of a blank part, it is necessary to know local temperatures. However, the analytical research of local temperatures when grinding with ultrasonic vibrations is not carried out.

The goal of this research is the determination of vibrations parameters influence on the temperature field of grinding process.

The research objectives are: the development of physical and mathematical models for calculation of temperature field, methodology, algorithm and software for temperatures calculation, temperature numerical simulation.

*Scientific novelty:* it is the first analytical research of temperature field when grinding with ultrasonic activation.

The authors developed physical and mathematical models for calculation of temperature field while grinding that take into account the alteration of kinematics of abrasive grains micro-cutting and the mechanical properties of blank part material while grinding with ultrasonic activation, and the parameters dependences characterizing blank part material dispersion resistance and thermophysical properties of interacting objects materials (abrasive grain, blank part, chippings, environment) on the temperature. The simulation is carried out on the basis of joint solution of thermal conductivity differential equations written for each interacting object. To calculate equations, the authors used the finite-elements method. The authors developed the methods and the software for temperature field calculation. The article gives the results of numerical simulation of temperatures by low vibration amplitudes slightly changing micro-cutting kinematics. By ultrasonic vibrations, the blank part temperature was by 10% lower, and the local temperatures in the zone of contact of abrasive grain with the blank part and the chippings was by 14% and 15% lower correspondingly.