

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРАВКИ НА ЭНЕРГО-СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВРЕЗНОГО КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ

© 2019

**С.В. Мурашкин**, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»  
**А.С. Селиванов**, кандидат технических наук, доцент,  
заместитель ректора – директор Института машиностроения  
**В.И. Малышев**, кандидат технических наук, профессор  
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

**Ключевые слова:** ультразвуковая правка; силы шлифования; цикл шлифования; мощность шлифования; правящий инструмент.

**Аннотация:** Выполнены экспериментальные исследования влияния ультразвуковой правки шлифовальных кругов на энерго-силовые показатели процесса шлифования. Показана степень влияния ультразвуковой правки на показатели врезного круглого шлифования в автоматическом цикле обработки. Установлено, что ультразвуковая правка шлифовальных кругов правящим инструментом, совершающим колебания с частотой порядка 22 кГц и амплитудой 10...15 мкм, позволяет в 4–5 раз снизить опорную поверхность рельефа шлифовального круга за счет увеличения количества абразивных зерен с относительно острыми микроромками и микротрещинами. Показано, что особенности формирования рельефа рабочей поверхности шлифовального круга при ультразвуковой правке обеспечивают снижение нормальной составляющей силы резания почти на 30 % в течение всего периода стойкости шлифовального круга, а также позволяют повысить стойкость круга примерно в 1,5...2 раза. Отмечено, что при ультразвуковой правке за счет периодического ударного нагружения абразивные зерна разрушаются, образуя многочисленные режущие кромки и микротрещины при меньшей, чем после обычной правки (ОП), глубине правки. В результате интерференции синусоидальных траекторий вершин алмазов правящего инструмента на шлифовальном круге формируется определенный рельеф в виде впадин и выступов, что снижает относительную опорную поверхность круга. Наличие двух составляющих рельефа объясняет более высокую режущую способность шлифовального инструмента по сравнению с обычной правкой.

### ВВЕДЕНИЕ

Достижимые показатели качества шлифованных поверхностей деталей в условиях крупносерийного и массового производства во многом определяются режущей способностью шлифовальных кругов в течение периода стойкости [1–3]. Ультразвуковая правка (УЗП) шлифовального круга на операциях абразивной обработки является одним из перспективных способов повышения режущей способности шлифовальных кругов [4–6]. Как отмечено в работах [6–8], УЗП формирует на поверхности шлифовального круга особый микрорельеф. Ударная нагрузка правящего инструмента создает на абразивных зернах значительное количество микросколов, позволяющих удалять стружку при шлифовании с меньшими усилиями, чем при обычной правке (ОП) [9–11].

Цель работы – экспериментальное определение влияния ультразвуковой правки на показатели врезного шлифования с автоматическим циклом обработки и выявление динамики их изменения в течение периода стойкости круга.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния УЗП шлифовального круга на энерго-силовые показатели шлифования выполняли на станке ЗТ161 с автоматической врезной подачей по методике, изложенной в работе [9].

Правку круга как с наложением ультразвука, так и без него осуществляли на специальном комплексе для ультразвуковой правки, состоящем из ультразвукового генератора модели УЗГ-0,6/22-М и ультразвукового устройства с ультразвуковой колебательной системой на

базе магнитострикционного преобразователя и волновода. В качестве правящего инструмента использовали алмазную четырехкристальную гребенку (ТУ 8-037-230-78).

Состояние поверхности круга количественно оценивали по значению коэффициента режущей способности шлифовального круга  $K_Q$ , вычисляемого по формуле [12]

$$K_Q = \frac{Q_M}{P_{yc}},$$

где  $Q_M$  – интенсивность съема металла в цикле (отношение объема металла, срезанного с заготовки за цикл обработки, ко времени цикла), мм<sup>3</sup>/с;

$P_{yc}$  – средняя за цикл радиальная составляющая силы резания, Н.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важным параметром, характеризующим энергоемкость любого процесса механической обработки, является сила резания [13; 14]. На рис. 1 представлены данные по изменению составляющих сил резания в цикле перемещения шлифовальной бабки после различных способов правки шлифовальных кругов. На рис. 1 видно, что процесс ультразвуковой правки способствует в большей степени снижению нормальной составляющей силы резания  $P_y$ . Так, сила  $P_y$  при шлифовании кругом после УЗП оказалась в два раза ниже силы  $P_y$  при шлифовании кругом после ОП. Снижение нормальной составляющей силы резания при шлифовании способствует уменьшению упругой деформации технологической

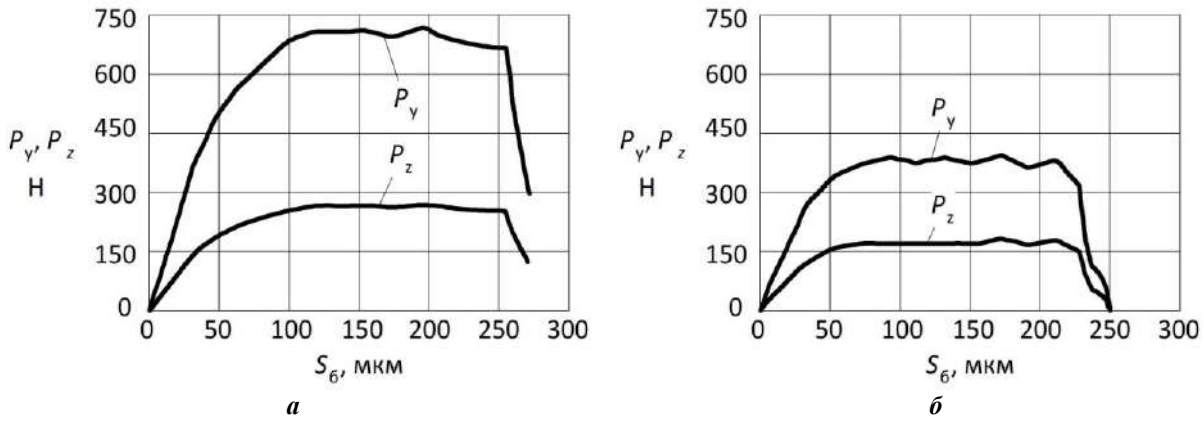


Рис. 1. Зависимости сил резания при шлифовании от перемещения шлифовальной бабки  $S_6$ : а – ОП; б – УЗП

системы и, следовательно, повышению точности обработки. На рис. 1 видно, что после УЗП шлифовальная бабка с кругом переместилась на 250 мкм для полного снятия припуска на шлифование в 240 мкм, а после ОП шлифовальная бабка переместилась на 270 мкм.

Снижение силы резания при шлифовании кругом, прошедшим УЗП, обусловлено спецификой формирования его рельефа. Правящий инструмент, совершая механические колебания небольшой амплитуды (порядка 10...15 мкм) с частотой 22 кГц, наносит по абразивным зернам микроудары с высокой интенсивностью, обуславливая их хрупкое разрушение и формирование на них множества микросколов [7]. Так, по данным работы [7], ультразвуковая правка снизила относительную опорную поверхность рельефа шлифовального круга в 4...5 раз по сравнению с ОП.

Обеспечение стабильности параметров качества шлифованных поверхностей во многом зависит от состояния рабочей поверхности шлифовального круга. При обработке круг засаливается, а его абразивные зерна истираются и затупляются. Поэтому важно установить, каким образом способ правки круга влияет на энерго-силовые показатели шлифования в течение периода стойкости круга.

На рис. 2 представлены данные об изменении составляющих силы резания  $P_y$  и  $P_z$  в течение периода

стойкости круга. Как следует из рис. 2, составляющая силы резания  $P_y$  при шлифовании кругом после УЗП оказалась меньше, чем при шлифовании кругом после ОП, на протяжении всего периода стойкости шлифовального круга. Это говорит о том, что УЗП позволяет не просто получить на поверхности шлифовального круга разовый рельеф непосредственно после правки, а создать его на протяжении всего периода стойкости круга, т. е. до следующей правки. Здесь можно предположить, что процесс УЗП способствует не только формированию множества режущих микрокромки за счет ударного разрушения абразивных зерен, но и зарождению в них микротрещин, которые в процессе шлифования формируют микросколы на абразивных зернах, повышая тем самым его режущую способность [7; 17]. В таблице 1 представлены данные о мощности шлифования образцов кругом после ОП и УЗП в течение всего периода стойкости шлифовального круга.

Преимущество в виде соотношения мощности шлифования ОП/УЗП при шлифовании кругом, прошедшим УЗП, сохраняется в течение всего периода стойкости круга.

На рис. 3 показана динамика изменения соотношения составляющих силы резания, характеризующих режущую способность шлифовального круга.

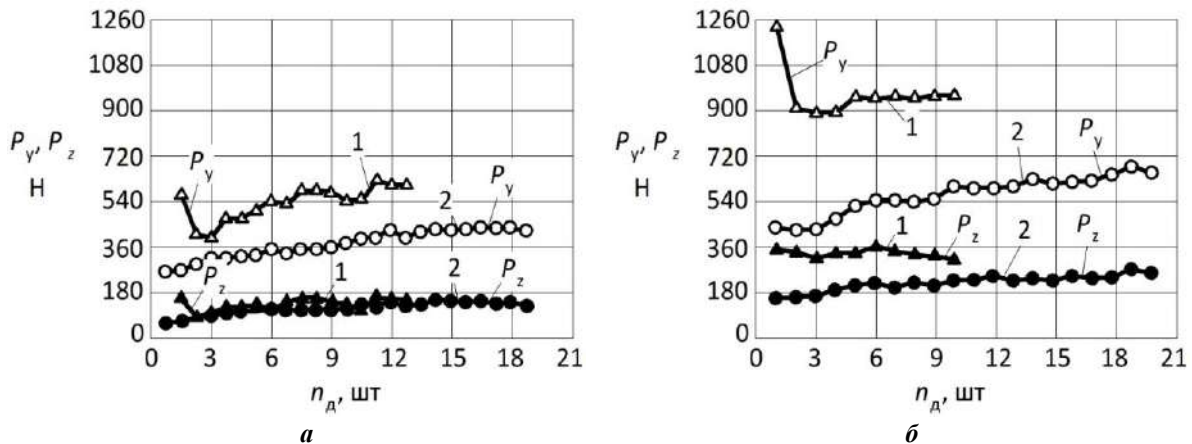


Рис. 2. Зависимости сил резания при шлифовании в течение периода стойкости круга: а – правка новым ПИ; б – правка изношенным ПИ.  $n_d$  – количество прошлифованных образцов; 1 – силы после ОП; 2 – силы после УЗП

Таблица 1. Значения мощности шлифования при различных способах правки

Порядковый номер шлифуемого образца	Мощность шлифования $N$ , кВт		
	ОП	УЗП	ОП/УЗП, %
1	7,96	5,48	145
8	8,65	6,78	127
12	8,60	6,90	120
17	8,54	7,16	119
25	-	7,13	-

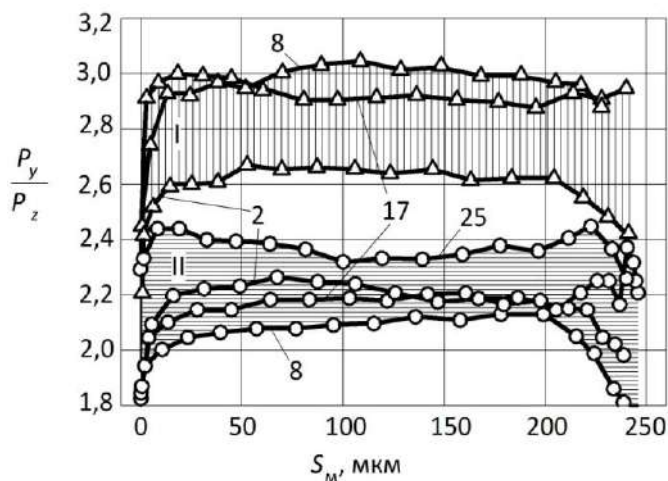


Рис. 3. Зависимости отношения сил резания за период стойкости круга:  
 I – ОП; II – УЗП.  $S_m$  – съем припуска; 2, 8, 17, 25 – порядковый номер прошлифованного образца

Согласно рис. 3, величина  $P_y/P_z$  имея небольшие колебания ( $\pm 0,06$ ), закономерно возрастает в связи с затуплением круга, независимо от метода правки. Так, при шлифовании 2, 8 и 17-го образцов значения  $P_y/P_z$  возрастают в пределах от 2,6 до 3,0 после ОП и от 2,1 до 2,2 после УЗП круга. Как видно, в течение всего периода стойкости круга величина  $P_y/P_z$  остается меньшей при шлифовании с УЗП круга. Это позволяет сделать вывод о более высокой режущей способности круга после УЗП.

На рис. 4 отображены изменения режущей способности шлифовального круга, оцениваемые коэффициентом  $K_Q$ , вычисленным по формуле (1). Физический смысл коэффициента режущей способности шлифовального круга  $K_Q$  заключается в интенсивности снятия кругом определенного объема металла, приходящегося на единицу нормальной составляющей  $P_y$  силы шлифования [18–20].

Как следует из рис. 4, величина  $K_Q$  после УЗП в течение всего периода стойкости примерно в 1,5 раза выше по сравнению с обычной правкой. Обращает на себя внимание низкое значение  $K_Q$  при шлифовании первого после ОП образца. Это характерно и для повышенных значений  $P_y$  и  $P_z$  (рис. 2) и объясняется наличием на РПК большого числа абразивных зерен с притупленными вершинами и их интенсивным приработочным износом в начальной фазе периода стойкости круга.

В целом анализ результатов, приведенных на рис. 2–4 и в таблице 1, дает основание сделать вывод о более высокой режущей способности круга после УЗП, по сравнению с ОП, и потенциальной возможности увеличения производительности шлифования.

Улучшение основных показателей врезного шлифования за счет УЗП круга объясняется особенностями формирования рельефа РПК при правке. При шлифовании в режиме затупления круга, характерном для автоматизированного массового производства с обычной правкой, на абразивных зернах постепенно формируются площадки износа. Относительно медленное увеличение износа зерен вплоть до некоторой критической величины в течение периода стойкости круга позволяет обеспечивать требуемые уровень и стабильность размеров и качество шлифованных поверхностей.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Правка шлифовальных кругов на операциях абразивной обработки с наложением на правящий инструмент ультразвуковых колебаний с частотой порядка 22 кГц и амплитудой 10...15 мкм позволяет в 4–5 раз снизить опорную поверхность шлифовального круга. Специфика формирования рельефа шлифовального круга обеспечивает снижение нормальной составляющей силы резания почти на 30 % в течение всего периода его стойкости. Кроме того, УЗП позволяет повысить

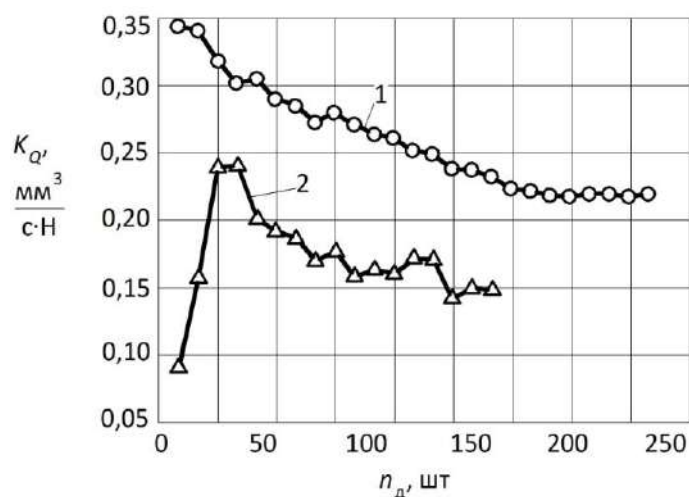


Рис. 4. Коэффициент режущей способности круга  $K_Q$  за период его стойкости: 1 – ОП; 2 – УЗП.  $n_{\delta}$  – число шлифованных образцов после правки круга

стойкость круга примерно в 1,5...2 раза. Как показали результаты исследований, УЗП круга обеспечивает меньшее, по сравнению с ОП, отношение составляющих сил резания на всем периоде стойкости круга.

Таким образом, на основании результатов проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что ультразвуковая правка шлифовальных кругов обеспечивает снижение энергоемкости процесса шлифования за счет управляемого формирования режущей способности шлифовального круга. При этом влияние ультразвуковой правки на энерго-силовые показатели процесса шлифования сохраняется в течение периода стойкости круга.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hashimoto F., Gallego I., Oliveira J.F.G., Barrenetxea D., Takahashi M., Sakakibara K., Stalfelt H.D., Stadt G., Ogawa K. Advances in centerless grinding technology // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2012. Vol. 61. № 2. P. 747–770.
- Wegener K., Bleicher F., Krajnik P., Hoffmeister H.W., Brecher C. Recent developments in grinding machines // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2017. Vol. 66. № 2. P. 779–802.
- Zhanga Y.Z., Xu X.P. Influence of surface topography evolution of grinding wheel on the optimal material removal rate in grinding process of cemented carbide // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Vol. 80. P. 130–143.
- Palmer J., Ghadbeigi H., Novovic D., Curtis D. An experimental study of the effects of dressing parameters on the topography of grinding wheels during roller dressing // Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 31. P. 348–355.
- Kadivara M., Azarhoushang B., Shamaray S., Krajnik R. The effect of dressing parameters on micro-grinding of titanium alloy // Precision Engineering. 2018. Vol. 51. P. 176–185.
- Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
- Малышев В.И., Мурашкин С.В., Комлев Р.В. Формирование рабочей поверхности шлифовального круга при ультразвуковой правке // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 2. С. 40–43.
- Малышев В.И., Мурашкин С.В., Селиванов А.С. Ультразвуковая правка, как средство повышения эффективности шлифования в условиях массового производства // Сборник научных трудов SWorld. 2012. Т. 7. № 3. С. 52–60.
- Малышев В.И., Попов А.Н., Мурашкин С.В. Влияние ультразвуковой правки круга на качество шлифованных поверхностей в условиях автоматизированного производства // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 101–105.
- Yanga Z., Zhang S., Zhang Z., Zhang Y., Hu J., Li K., Zhao B., Zhang Y. Experimental research on laser-ultrasonic vibration synergic dressing of diamond wheel // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 269. P. 182–189.
- Wegener K., Hoffmeister H.W., Karpuschewski B., Kuster F., Hahmann W.C., Rabiey M. Conditioning and monitoring of grinding wheels // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2011. Vol. 60. № 2. P. 757–777.
- Лурье Г.Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 172 с.
- Malkin S., Guo C. Grinding Technology. Theory and application of machining with abrasives. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008. 372 p.
- Fedoseev O.B. The Effect of Noise on Grinding Cycles // Journal of Engineering for Industry. 1991. Vol. 113. № 4. P. 474–476.
- Богачев Ю.Ю., Бабенко М.Г. Исследование стойкости рабочей поверхности шлифовального круга и правящего алмазного инструмента // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2015. Т. 17. № 2. С. 21–29.
- Малышев В.И., Мурашкин С.В. Определение количества объемно-разрушаемых абразивных зёрен шлифовального круга при ультразвуковой правке //

- Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 3. С. 60–65.
17. Schwarz K.E. Zerspanungsvorgauge und Schleifergebnis beim Abrichten von Grinding // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2001. Vol. 123. P. 319–324.
  18. Tawakoli T., Westkaemper E., Rasifard A. Ultrasonic Assisted Dressing of Vitrified CBN Grinding Wheel // 40<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Liverpool: Liverpool University, 2007. P. 121–125.
  19. Marinescu I.D., Rowe W.R., Dimitrov B., Ohmori H. *Tribology of abrasive machining processes*. New York: William Andrew, 2012. 763 p.
  20. Linke B., Klocke F. Temperatures and wear mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels // *International journal of machine tools and manufacture*. 2010. Vol. 50. № 6. P. 552–558.
- REFERENCES**
1. Hashimoto F., Gallego I., Oliveira J.F.G., Barrenetxea D., Takahashi M., Sakakibara K., Stalfelt H.D., Staadt G., Ogawa K. Advances in centerless grinding technology. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2012, vol. 61, no. 2, pp. 747–770.
  2. Wegener K., Bleicher F., Krajnik P., Hoffmeister H.W., Brecher C. Recent developments in grinding machines. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, no. 2, pp. 779–802.
  3. Zhanga Y.Z., Xu X.P. Influence of surface topography evolution of grinding wheel on the optimal material removal rate in grinding process of cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, vol. 80, pp. 130–143.
  4. Palmer J., Ghadbeigi H., Novovic D., Curtis D. An experimental study of the effects of dressing parameters on the topography of grinding wheels during roller dressing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 31, pp. 348–355.
  5. Kadivara M., Azarhoushang B., Shamaray S., Krajnik R. The effect of dressing parameters on micro-grinding of titanium alloy. *Precision Engineering*, 2018, vol. 51, pp. 176–185.
  6. Kiselev E.S. *Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki ratsionalnym ispolzovaniem energii ultrazvukovogo polya* [Intensification of the processes of mechanical treatment by rational use of the ultrasonic field energy]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2003. 186 p.
  7. Malyshev V.I., Murashkin S.V., Komlev R.V. The formation of the grinding circle working surface at ultrasonic editing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 2, pp. 40–43.
  8. Malyshev V.I., Murashkin S.V., Selivanov A.S. Ultrasonic dressing of the grinding circle, as means of increase of efficiency of grinding in the conditions of mass production. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 52–60.
  9. Malyshev V.I., Popov A.N., Murashkin S.V. Effect of ultrasound on edit the terms of quality polished surfaces under automated production. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 101–105.
  10. Yanga Z., Zhang S., Zhang Z., Zhang Y., Hu J., Li K., Zhao B., Zhang Y. Experimental research on laser-ultrasonic vibration synergic dressing of diamond wheel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 269, pp. 182–189.
  11. Wegener K., Hoffmeister H.W., Karpuschewski B., Kuster F., Hahmann W.C., Rabiey M. Conditioning and monitoring of grinding wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2011, vol. 60, no. 2, pp. 757–777.
  12. Lure G.B. *Shlifovanie metallov* [Metal grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 172 p.
  13. Malkin S., Guo C. *Grinding Technology. Theory and application of machining with abrasives*. 2nd ed. New York, Industrial Press Publ., 2008. 372 p.
  14. Fedoseev O.B. The Effect of Noise on Grinding Cycles. *Journal of Engineering for Industry*, 1991, vol. 113, no. 4, pp. 474–476.
  15. Bogachev Yu. Yu., Babenko M.G. Study of the resistance of the working surface of the grinding wheel and dressing diamond tool. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 21–29.
  16. Malyshev V.I., Murashkin S.V. Definition of quantity volume-destroyed abrasive grains of the grinding circle at to ultrasonic editing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 60–65.
  17. Schwarz K.E. Zerspanungsvorgauge und Schleifergebnis beim Abrichten von Grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, vol. 123, pp. 319–324.
  18. Tawakoli T., Westkaemper E., Rasifard A. Ultrasonic Assisted Dressing of Vitrified CBN Grinding Wheel. 40<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Liverpool, Liverpool University Publ., 2007, pp. 121–125.
  19. Marinescu I.D., Rowe W.R., Dimitrov B., Ohmori H. *Tribology of abrasive machining processes*. New York, William Andrew Publ., 2012. 763 p.
  20. Linke B., Klocke F. Temperatures and wear mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels. *International journal of machine tools and manufacture*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 552–558.

**THE STUDY OF INFLUENCE OF ULTRASONIC DRESSING  
ON THE ENERGY-FORCE INDICATORS OF CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING**

© 2019

**S.V. Murashkin**, PhD (Engineering), Associate Professor,  
assistant professor of Chair “Nanotechnologies, Material Science and Mechanics”

**A.S. Selivanov**, PhD (Engineering), Associate Professor,  
Deputy Rector – Director of Mechanical Engineering Institute

**V.I. Malyshev**, PhD (Engineering), Professor  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* ultrasonic dressing; grinding forces; grinding cycle; grinding power; dressing tool.

*Abstract:* The authors carried out the experimental study of the influence of ultrasonic dressing of grinding wheels on the energy-force indicators of the grinding process. The study showed the degree of ultrasonic dressing influence on the cylindrical plunge grinding indicators in the automatic cycle of processing. The authors identified that ultrasonic dressing of grinding wheels with a dressing tool executing vibrations with the frequency of 22 kHz and the amplitude of 10...15 μm allows decreasing the supporting face of a grinding wheel texture 4–5 times through the increase of the abrasive grains quantity with the relatively sharp micro-edges and microcracks. It is shown, that the distinctive features of formation of the grinding wheel working surface texture during ultrasonic dressing ensure the reduction of cutting perpendicular force about by 30 % during the whole period of grinding wheel life as well as allows increasing the wheel life 1.5...2 times. It is noted that during the ultrasonic dressing, the abrasive grains break due to the repetitive impact loading creating numerous cutting edges and microcracks at the less dressing depth than after traditional dressing. In the result of interference of sinusoidal trajectories of diamond points of a dressing tool, on a grinding wheel, a certain cammed texture forms, what decreases the wheel bearing surface. The existence of two texture components explains the higher cutting power of a grinding tool compared to the traditional dressing.