

Унянин Александр Николаевич¹, доктор техн. наук, профессор, Хазов Александр Васильевич², главный инженер

¹Ульяновский государственный технический университет, 432027, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

²АО «Ульяновский механический завод», 432008, Россия, г. Ульяновск, ул. Московское шоссе, 94

E-mail: a_un@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ЗАГОТОВКУ

Аннотация: Использование энергии ультразвуковых колебаний (УЗК) является одним из направлений повышения эффективности процессов механической обработки. Для наложения колебаний на заготовку в процессе шлифования предложено устройство, в котором она является одним из звеньев колебательной системы. Однако эффективность устройства выявлена недостаточно полно. Исследования выполнены с целью оценки влияния амплитуды колебаний и времени работы шлифовального круга на эффективность шлифования заготовок с использованием предложенного устройства.

Рассмотрена возможность повышения эффективности плоского шлифования за счет использования энергии УЗК, накладываемых на заготовку в направлении, совпадающем с осью шлифовального круга. Заготовка закрепляется в устройстве между излучателем колебаний и опорой, т.е. является одним из звеньев колебательной системы. Конструкция устройства обеспечивает минимальные потери энергии УЗК и максимальную амплитуду колебаний заготовки. Колебания в направлении, совпадающем с осью круга, как показали исследования, обеспечивают наиболее благоприятные показатели шлифования. Экспериментальные исследования выполнили при шлифовании периферией круга заготовок из сталей 3ХЗМЗФ и 12Х18Н10Т. Установлено изменение параметров процесса шлифования в зависимости от амплитуды УЗК и времени работы шлифовального круга. При шлифовании с УЗК обеспечивается снижение сил шлифования на 10 ... 15%, износа круга на 25 ... 40%, высотных параметров шероховатости обработанной поверхности на 25%; коэффициент шлифования увеличивается до 70%, а период стойкости круга в 3 ... 3,5 раза.

Ключевые слова: шлифование, ультразвуковые колебания, эффективность, шлифовальный круг, заготовка, сила, износ, шероховатость.

Информация о статье: принята 08 декабря 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-55-62

Одним из направлений повышения эффективности процессов механической обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов является использование энергии ультразвуковых колебаний (УЗК). Применение УЗК изменяет кинематику процесса резания [1] и способствует снижению коэффициента трения в зоне контакта инструмента с заготовкой [2]. Под влиянием УЗК интенсифицируются процессы проникновения смазочно-охлаждающих жидкостей в зону обработки и реализации ими своих технологических свойств [3]. В результате снижаются силы [4] и температуры [5], повышается работоспособность инструмента [6] и качество деталей [7]. Большинство исследователей отмечают снижение интенсивности изнашивания при использовании УЗК [8] (но по другим данным износ инструмента может увеличиться [2]). Выявлено снижение параметров микрогеометрии обработанных поверхностей при шлифовании хромоникелевых [9] и конструкционных сталей [10].

При шлифовании колебания накладываются на круг и обрабатываемую заготовку, причем последний вариант реализовать гораздо проще, особенно

при плоском шлифовании. Для наложения УЗК на заготовку в процессе шлифования разработано устройство, в котором она является одним из звеньев колебательной системы [11], что позволяет значительно сократить рассеивание энергии. Однако эффективность устройства на операциях шлифования выявлена недостаточно полно.

Цель исследования – оценка влияния амплитуды колебания и времени работы шлифовального круга на параметры процесса плоского шлифования заготовок из труднообрабатываемых материалов.

В результате моделирования процесса плоского шлифования периферией круга с наложением на заготовку УЗК в различных направлениях получены математические зависимости, устанавливающие влияние колебаний на кинематику взаимодействия абразивных зерен круга (режущих и пластически деформирующих) с заготовкой. Установлено, что колебание частиц материала заготовки в направлении оси шлифовального круга изменяет форму и длину царапин и их суммарную площадь (следов сечений) от зерен, а также площадь поверхности зерен, контактирующих с заготовкой. Колебание в этом

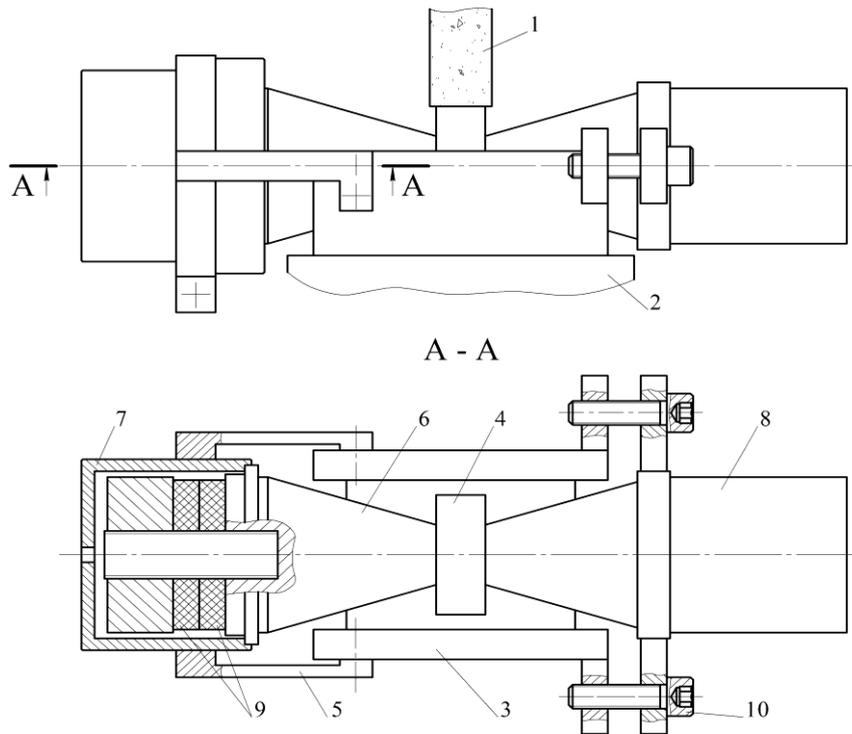


Рис. 1. Схема наложения УЗК на заготовку: 1 – шлифовальный круг; 2 – магнитная плита станка; 3 – рамка; 4 – заготовка; 5 – кронштейн; 6 – излучатель; 7 – корпус; 8 – опора; 9 – пьезопреобразователи; 10 – винты

Fig. 1. Scheme overlay ultrasonic vibrations on the workpiece: 1 – grinding wheel; 2 – magnetic plate of machine-tool; 3 – frame; 4 – workpiece; 5 – bracket; 6 – emitter; 7 – housing; 8 – support; 9 – piezoelectric converters; 10 – screws

направлении обеспечивает уменьшение высотных параметров шероховатости за счет увеличения числа зерен, диспергирующих материал заготовки. В то же время амплитуда колебания частиц материала заготовки в нормальном к обрабатываемой поверхности направлении (колебание в этом направлении является результатом распространения в заготовке сдвиговых волн) достаточна, чтобы уменьшить коэффициент трения зерен о заготовку за счет изменения кинематики и увеличить число зерен, диспергирующих материал заготовки. Поэтому при проведении данных исследований колебания на заготовку накладывали в направлении, совпадающем с осью круга [12].

Колебание заготовки приводит к качественному изменению процесса диспергирования ее материала зернами круга. Наложение УЗК приводит к уменьшению пределов прочности и текучести материала заготовки, а также его способности к упрочнению в процессе деформации [13].

Средние по плоскости сдвига касательные напряжения, определяющие силу микрорезания единичными зернами круга [14],

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

где σ_{is} – интенсивность напряжений при скорости и температуре деформации процесса шлифования, Па [14], которую можно определить по зависимости, предложенной в работе [15]:

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

где σ_B – временное сопротивление материала заготовки, Па; T – температура деформации, К.

Наложение колебаний на заготовку приводит к изменению временного сопротивления ее материала, которое становится равным

$$\sigma_B^1 = k_{\sigma B} \cdot \sigma_B,$$

где $k_{\sigma B}$ – коэффициент, показывающий степень уменьшения параметра σ_B при наложении колебаний [13].

Сила диспергирования зернами, осуществляющими пластическое деформирование материала заготовки, определяется пределом текучести материала заготовки σ_T .

При наложении колебаний предел текучести материала заготовки становится равным

$$\sigma_T^1 = k_{\sigma T} \cdot \sigma_T.$$

где $k_{\sigma T}$ – коэффициент, показывающий степень уменьшения σ_T при наложении колебаний [16]. Поскольку коэффициенты $k_{\sigma B}$ и $k_{\sigma T}$ меньше единицы, то можно прогнозировать снижение силы шлифования за счет уменьшения значений параметров τ_s и σ_T .

Колебание частиц материала заготовки в нормальном к обрабатываемой поверхности направлении приводит к изменению глубины внедрения абразивных зерен в заготовку. За счет периодического прерывания процесса диспергирования при выходе

Таблица 1. Влияние амплитуды УЗК на составляющие силы шлифования

Table 1. The influence of the amplitude of ultrasonic vibrations on the components of the grinding force

Материал заготовки	Амплитуда A_z УЗК, мкм				
	0	3	6	9	12
3Х3М3Ф	15,2/13	14,8/12,5	14,2/12,3	13,9/12,1	13,6/11,7
12Х18Н10Т	14,5/13,5	13,6/12,8	13/12,4	12,8/12,4	12,3/12

Примечание. В числителе приведены значения силы P_y , в знаменателе – силы P_z

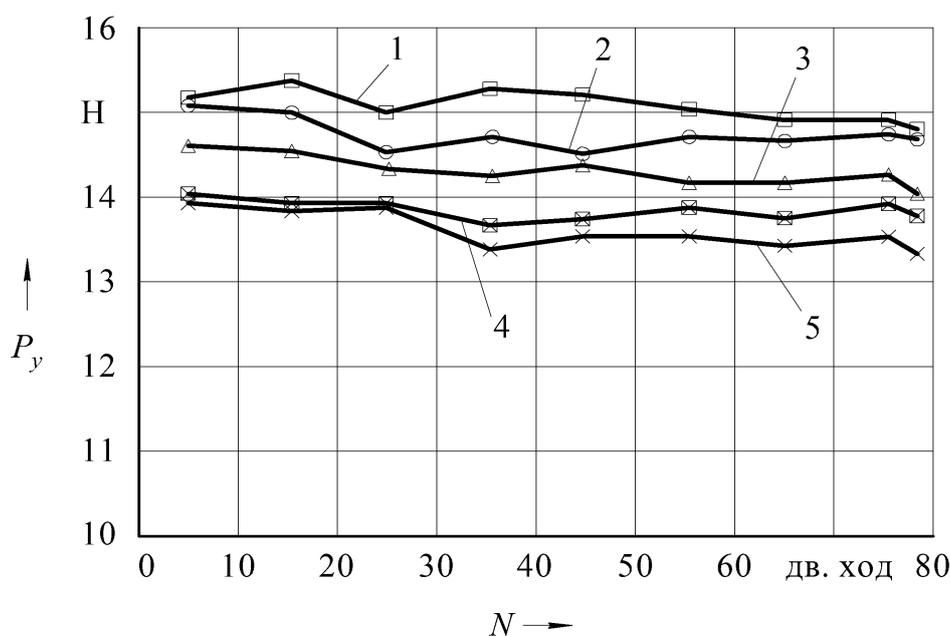


Рис. 2. Зависимость радиальной составляющей силы шлифования P_y от числа двойных ходов N и амплитуды A_z УЗК, накладываемых на заготовку: 1 – без УЗК; 2 – $A_z = 3$ мкм; 3 – $A_z = 6$ мкм; 4 – $A_z = 9$ мкм; 5 – $A_z = 12$ мкм; материал заготовки – сталь 3Х3М3Ф

Fig. 2. The dependence of the radial component of the grinding force P_y on the number of double strokes N and amplitude A_z ultrasonic vibrations superimposed on the workpiece: 1 – without ultrasonic vibrations; 2 – $A_z = 3$ microns; 3 – $A_z = 6$ microns; 4 – $A_z = 9$ microns; 5 – $A_z = 12$ microns; workpiece material-steel 3Х3М3Ф

зерна из контакта с заготовкой при больших амплитудах УЗК возможно снижение коэффициента трения абразивного зерна о заготовку, функционально связанного с силой шлифования. Колебание частиц материала заготовки в нормальном направлении приводит также к существенному увеличению количества зерен, диспергирующих материал заготовки [12], что позволяет прогнозировать меньший износ и засаливание зерен а следовательно, больший период стойкости шлифовального круга.

Экспериментальные исследования выполнили при плоском маятниковом шлифовании периферией круга заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т, относящихся к 1-й и 3-й группам обрабатываемости шлифованием соответственно и обладающих высокой пластичностью. Шлифование осуществляли кругом 25А25(F60)ПСМ1(К)6К6(V) (в скобках приведены обозначения зернистости, твердости и связки круга по ГОСТ Р 52381) с рабочей скоростью 35 м/с, со скоростью продольной подачи $V_{спр} = 10$ м/мин; врезная подача составляла $S_{вр} = 0,01$ мм/дв. ход; частота УЗК, накладываемых на заготовку $f = 18,6$ кГц; амплитудой УЗК варьировали в диапазоне

от 3 до 12 мкм. Смазочно-охлаждающую жидкость – 3%-й раствор кальцинированной соды – подавали в зону шлифования поливом с расходом 10 дм³/мин.

Для наложения на заготовку колебаний использовали устройство, в котором она являлась одним из звеньев колебательной системы (рис. 1). Заготовку 4 поджимали опорой 8 к торцу излучателя УЗК (волновода) 6 с помощью винтов 10. Рамка 3 устанавливается на магнитную плиту 2 станка. Упругие механические колебания, генерируемые с помощью пьезопреобразователей 9, сообщаются заготовке через излучатель (волновод) 6, установленный в корпусе 7. Суммарная длина излучателя, заготовки и опоры была равна длине волны УЗК, а заготовка имела максимальную амплитуду колебаний. Минимальные потери энергии УЗК и высокая амплитуда колебаний заготовки достигаются также за счет плотного контакта излучателя с заготовкой, обеспечиваемого в процессе ее закрепления.

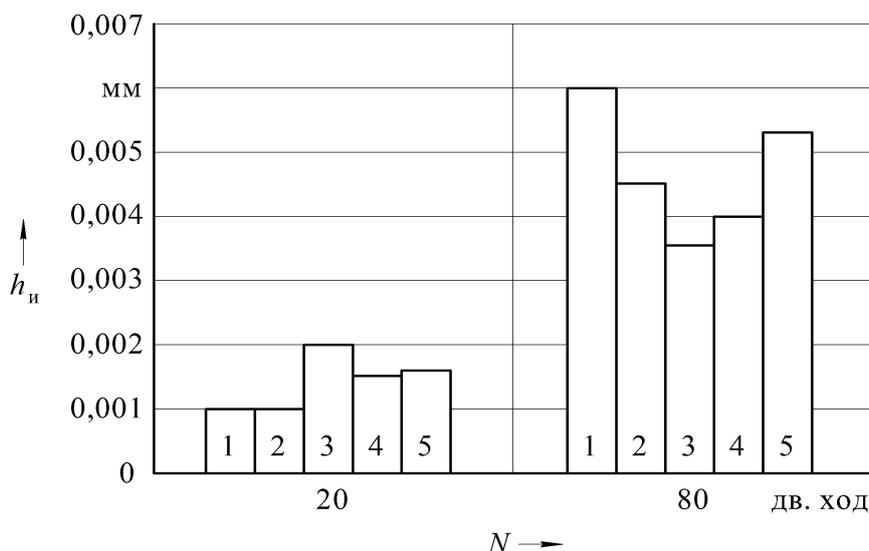


Рис. 3. Зависимость износа круга h_w от числа двойных ходов N и амплитуды УЗК, накладываемых на заготовку: условия см. в подписи к рис. 2

Fig. 3. The dependence of the wear of the wheel h_w on the number of double strokes N and the amplitude of the narrow, superimposed on the workpiece: conditions see the caption to Fig. 2

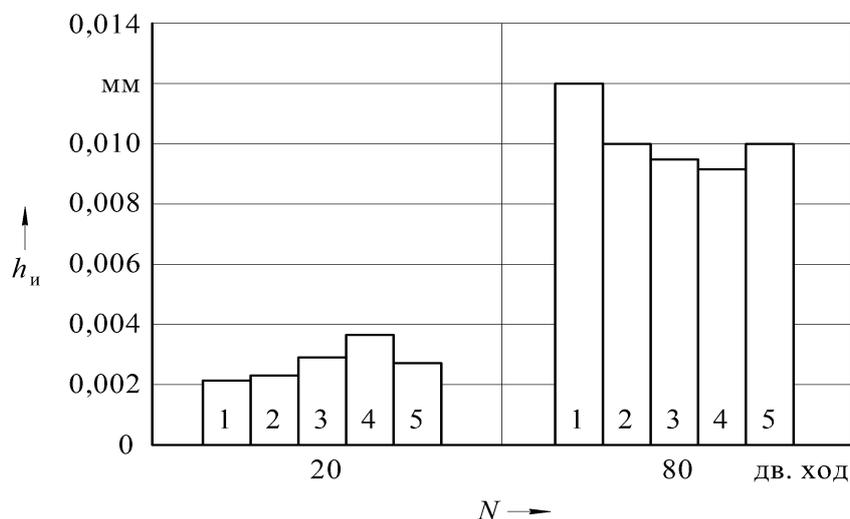


Рис. 4. Зависимость износа круга h_w от числа двойных ходов N и амплитуды УЗК, накладываемых на заготовку: материал заготовки – 12X18H10T; остальные условия см. в подписи к рис. 2

Fig. 4. The dependence of the wear of the wheel h_w on the number of double strokes N and the amplitude of the narrow, superimposed on the workpiece: the workpiece material-12X18H10T; the rest of the conditions, see the caption to Fig. 2

Подобные приспособления можно использовать для установки на плоскошлифовальных станках заготовок деталей из труднообрабатываемых материалов (высоколегированных сталей и сплавов, титановых сплавов и др.), не обладающих достаточными магнитными свойствами для закрепления их с помощью магнитной плиты.

Для оценки эффективности процесса шлифования использовали следующие показатели:

- составляющие силы шлифования – радиальную P_y и касательную P_z , Н;
- износ шлифовального круга h_w , мкм;
- коэффициент шлифования $K_{ш}$, рассчитываемый как отношение съема материала заготовки к расходу шлифовального круга;
- период стойкости шлифовального круга τ_c , мин.

- параметры шероховатости шлифованной поверхности Ra , Rz , $Rmax$, мкм.

Составляющие силы шлифования измеряли с помощью динамометра УДМ-100, сигнал с которого поступал на усилитель TDA, затем АЦП 16/16 – SIGMA/USB. Использовали программное обеспечение ZetLab Studio. Размерный износ круга измеряли с помощью индикаторной головки 1МИГ (ГОСТ 9696-82, цена деления 0,001 мм), закрепленной на стойке, установленной на столе станка. Замеры производили до и после шлифования. Размерный износ измеряли через каждые 3 мм высоты рабочей поверхности круга, не менее чем в четырех сечениях круга в окружном направлении.

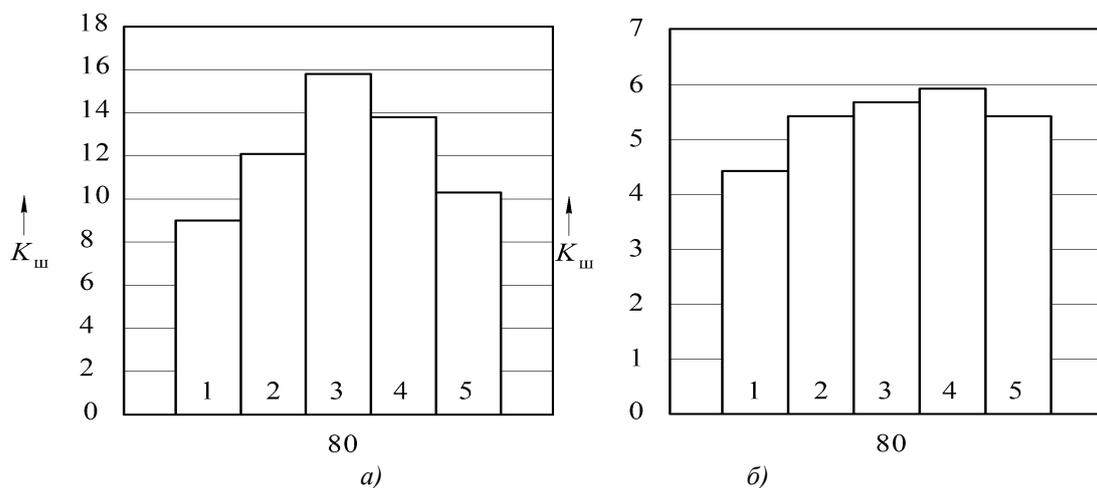


Рис. 5. Зависимость коэффициента шлифования K_{sh} от амплитуды УЗК, накладываемых на заготовку: а – материал заготовки сталь 3Х3М3Ф; б – материал заготовки сталь 12Х18Н10Т; $N = 80$ дв.ход.; остальные условия см. в подписи к рис. 2

Fig. 5. The dependence of the coefficient of grinding K_{sh} amplitude ultrasonic vibrations superimposed on the workpiece: а – workpiece material steel 3KH3M3F; б – workpiece material steel 12KH18H10T; $N = 80$ double strokes; for the rest of the conditions, see the caption to Fig. 2

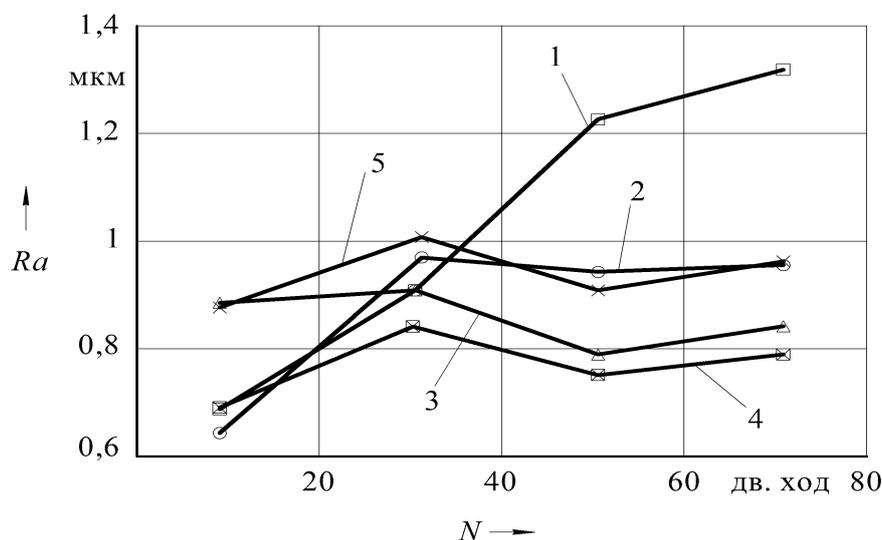


Рис. 6. Зависимость параметра шероховатости Ra от числа двойных ходов N и амплитуды УЗК: условия см. в подписи к рис. 2

Fig. 6. The dependence of the roughness parameter Ra on the number of double strokes N and the amplitude of ultrasonic vibrations: conditions see the caption to Fig. 2

Составляющие силы шлифования уменьшаются с увеличением амплитуды колебаний, накладываемых на заготовку. Минимальное значение сил зафиксировано при максимальной используемой амплитуде, равной 12 мкм. При шлифовании заготовок из стали 3Х3М3Ф силы шлифования P_y и P_z при обработке с этой амплитудой снизились в сравнении с обработкой без наложения УЗК на 10% (табл. 1, рис. 2). При обработке заготовок из стали 12Н18Х10Т составляющие силы шлифования P_y и P_z снизились на 15 и 11% соответственно (см. табл. 1).

В начальный период наработки шлифовального круга (после 20 двойных ходов) его износ при наложении УЗК оказался несколько выше, что можно объяснить более интенсивным скалыванием и выкрашиванием зерен за счет их циклического нагружения (рис. 3, 4). При увеличении наработки круга

(после 80 двойных ходов) износ оказался ниже при наложении УЗК, что объясняется менее интенсивным затуплением зерен за счет уменьшения тепло-силовой напряженности процесса шлифования и увеличения числа активных зерен, диспергирующих материал заготовки. Минимальный износ круга зафиксирован при шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т с амплитудой УЗК, равной 6 и 9 мкм соответственно. Этот износ на 42 и 24% ниже, чем при шлифовании без наложения УЗК. При увеличении амплитуды колебаний до 12 мкм износ увеличивается за счет интенсификации скалывания и вырывания зерен.

Коэффициент шлифования увеличился на 70% для стали 3Х3М3Ф и на 37% для стали 12Х18Н10Т, что можно объяснить уменьшением износа круга

Таблица 2. Влияние амплитуды УЗК на параметры шероховатости обработанных поверхностей

Table 2. Influence of the amplitude of ultrasonic vibrations on the roughness parameters of the treated surfaces

Материал заготовки	Параметры шероховатости, мкм	Амплитуда A_z УЗК, мкм				
		0	3	6	9	12
3Х3М3Ф	Ra	1	0,95	0,85	0,75	0,95
	Rz	4,2	4	3,9	3,8	4,1
	$Rmax$	6,1	6	5,8	5	6
12Х18Н10Т	Ra	1,1	1	0,86	0,84	1,1
	Rz	7,5	7,1	7	7,3	7,4
	$Rmax$	9,5	9,3	9,2	8,7	9,9

вследствие снижения теплосилового напряженности при наложении УЗК (рис. 5).

Для выявления периода стойкости шлифовального круга выполнили серию исследований, в ходе которых шлифование осуществляли до появления следов дробления на обработанных поверхностях. Период стойкости шлифовального круга при наложении УЗК оказался выше, чем при обработке без их наложения, в среднем в 3 ... 3,5 раза.

При шлифовании без наложения УЗК параметры шероховатости увеличиваются с увеличением наработки шлифовального круга (числа двойных ходов N), причем особенно интенсивно – при шлифовании заготовок из стали 3Х3М3Ф (рис. 6).

При наложении УЗК на заготовку в направлении, совпадающем с осью шлифовального круга, частицы материала заготовки колеблются и в направлениях, перпендикулярных распространению колебаний за счет распространения сдвиговых волн. Колебания в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, увеличивают разновысотность абразивных зерен, причем последняя увеличивается с ростом амплитуды колебаний [14]. Поэтому зависимость высотных параметров шероховатости от амплитуды УЗК имеет экстремальный характер.

Минимальное значение высотных параметров шероховатости зафиксировано при амплитуде УЗК, равной 9 мкм (табл. 2). При такой амплитуде параметр Ra оказался ниже на 25 и 24% при шлифовании заготовок из стали 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т соответственно. Влияние ультразвуковых колебаний на параметры Rz и $Rmax$ аналогично их влиянию на параметр Ra (см. табл. 2).

В результате установлено, что наложение на заготовку УЗК с помощью приспособления, в котором она является одним из звеньев колебательной системы, обеспечивает снижение сил шлифования на 10 ... 15%, износа круга на 25 ... 40%, высотных параметров шероховатости на 25%; коэффициент шлифования увеличивается до 70%, а период стойкости круга в 3 ... 3,5 раза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 19-48-730002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов, С.И. Нарезание зубчатых колес с использованием ультразвука / С.И. Агапов, Ю.И. Сидякин. – Волгоград: Изд-во ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. – 148 с.
2. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
3. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Под. общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
4. Unyanin, A.N. Grinding Forces in the Presence of Ultrasound // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38 – No 12. – p.p. 193-197.
5. Унянин, А.Н. Влияние технологических факторов на локальные температуры при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний // Вектор науки ТГУ. – 2016. – № 1 (35). – С. 48-53.
6. Нерубай, М.С. Физико-механические методы обработки. – Куйбышев: КуАИ, 1979. – 92 с.
7. Кумабэ, Д. Вибрационное резание / Перевод с яп. С.Л. Масленникова; под ред. И.И. Портнова и В.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
8. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин, В.В. Калашников, М.С. Нерубай, Б. Л. Штриков. М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
9. Wen, Y. Study on contact performance of ultrasonic-assisted grinding surface / Y. Wen, J. Tang, W. Zhou, C. Zhu // Ultrasonics. – 2019. Vol. 91. – p.p. 193-200.
10. Chen, H. An experimental study of the effects of ultrasonic vibration on grinding surface roughness of C45 carbon steel / H. Chen, J. Tang, W. Zhou // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 68. – p.p. 2095-2098.
11. Патент RU 2418670 РФ, МПК В 24 В 1 / 04, В 24 В 5 / 04. Способ плоского шлифования с наложением ультразвуковых колебаний / А.Н. Унянин, И.Ю. Терехин. – № 2008142342/02. – Заявл. 24.10.2008. – Оpubл. 20.05.2011. – Бюл. № 14.
12. Унянин, А.Н. Исследование кинематики взаимодействия шлифовального круга с заготовкой при наложении ультразвуковых колебаний / А.Н.

Унянин, А.В. Хазов // Вектор науки ТГУ. – 2018. – № 2 (44). – С. 47-52.

13. Подураев, В.Н. Обработка резанием с вибрациями. – М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.

14. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

15. Носенко, В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.

16. Штриков, Б.Л. Влияние ультразвука на характер пластической деформации материалов при обработке клепаных соединений / Б.Л. Штриков, И.В. Малкина // Материалы международной НТК «Высокие технологии в машиностроении». – Самара: СГТУ, 2005. – С. 140-142.

Alexander N. Unyanin¹, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Alexander V. Khazov**², chief engineer

¹Ulyanovsk state technical University,

432027, 32 Severny Venets Street, Ulyanovsk, Ulyanovsk region, Russian Federation

²JSC "Ulyanovsk mechanical plant», 432008, St. Moscow highway, 94, Ulyanovsk, Russian Federation,

STUDY OF THE EFFICIENCY OF FLAT GRINDING WITH THE APPLICATION OF ULTRASONIC VIBRATIONS TO THE WORKPIECE

Abstract: *The use of energy of ultrasonic vibrations is one of the directions of increase of efficiency of processes of mechanical processing. To impose vibrations on the workpiece during grinding, a device is proposed in which it is one of the links of the oscillatory system. However, the effectiveness of the device is not fully revealed. The researches were carried out to assess the influence of the vibration amplitude and the operating time of the grinding wheel on the efficiency of grinding workpieces using the proposed device. The possibility of increasing the efficiency of flat grinding by using the energy of ultrasonic vibrations (UZK), superimposed on the workpiece in the direction coinciding with the axis of the grinding wheel. To impose vibrations used a device in which the workpiece is fixed between the oscillator and the support, ie is one of the links of the oscillatory system. The design of the device provides a minimum loss of energy UZK and the maximum amplitude of the narrow oscillation of the workpiece. Fluctuations in the direction coinciding with the axis of the circle, as studies have shown, provide the most favorable indicators of grinding. Experimental studies were performed with grinding of the periphery of the round billets of steel 12KH18N10T and 3KH3M3F. The change of parameters of the grinding process depending on the amplitude of the narrow UZK and the operating time of the grinding wheel. When grinding UZK with a narrow grinding force is reduced by 10 ... 15%, wheel wear by 25 ... 40%, the height parameters of the roughness of the treated surface by 25%; grinding coefficient increases to 70%, and the period of resistance of the circle in 3 ... 3.5 times.*

Keywords: *grinding, ultrasonic vibrations, efficiency, grinding wheel, workpiece, force, wear, roughness.*

Article info: *received December 08, 2019*

DOI: *10.26730/1816-4528-2019-6-55-62*

REFERENCES

1. Agapov, S.I. Cutting gears using ultrasound / S.I. Agapov, Yu.I. Sidiyakin. – Volgograd: Publisher IUNL VolgSTU, 2010. – 148 p.

2. Markov, A.I. Ultrasonic processing of materials. – Moscow: Mashinostroenie, 1980. – 237 p.

3. Lubricating-cooling technological means and their application in machining: Handbook / Under the General editorship of L.V. Khudobin. – Moscow: Mashinostroenie, 2006. – 544 p.

4. Unyanin, A.N. Grinding Forces in the Presence of Ultrasound // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38 – No 12. – pp. 193-197.

5. Unyanin, A.N. The influence of technological factors on the local temperature during the grinding with the application of ultrasonic vibrations // Science vector of Togliatti State University. – 2016. – No. 1 (35). – pp. 48-53.

6. Nerubay, M.S. Physico-mechanical methods of processing. – Kuibyshev: KuAI, 1979. – 92 p.

7. Kumabe, D. Vibrational cutting / Translated from Japanese By S.L. Maslennikov; edited By I.I. Portnov and V.V. Belov. – Moscow: Mashinostroenie, 1985. – 424 p.

8. Application of ultrasound and explosion in processing and assembly / M.F. Vologin, V.V. Kalashnikov, M.S. Nerubay, B.L. Shtrikov. Moscow: Mashinostroenie, 2002. – 264 p.

9. Wen, Y. Study on contact performance of ultrasonic-assisted grinding surface / Y. Wen, J. Tang, W. Zhou, C. Zhu // Ultrasonics. – 2019. Vol. 91. – pp. 193-200.

10. Chen, H. An experimental study of the effects of ultrasonic vibration on grinding surface roughness of C45 carbon steel / H. Chen, J. Tang, W. Zhou // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 68. – pp. 2095 – 2098.

11. Patent RU 2418670 RF, IPC 24 V 1 / 04, 24 V 5 / 04. Method of surface grinding with application of ultrasound oscillations / A.N. Unyanin, I.Y. Terekhin. – No. 2008142342/02. – Bill. 24.10.2008. Publ. 20.05.2011. – Bull. No. 14.

12. Unyanin, A.N. Research of kinematics of interaction of a grinding wheel with a workpiece at superimposition of ultrasonic vibrations / A.N. Unyanin, A.V. Khazov // Science vector of Togliatti State University. – 2018. – No. 2 (44). – pp. 47-52.

13. Poduraev, V.N. processing by cutting with vibrations. – Moscow: Mashinostroenie, 1970. – 350 p.

14. Korchak, S.N. Productivity of the process of grinding steel parts. – Moscow: Mashinostroenie, 1974. – 280 p.

15. Nosenko, V.A. Grinding of adhesive-active metals. – Moscow: Mashinostroenie, 2000. – 262 p.

16. Shtrikov, B.L. Influence of ultrasound on the character of plastic deformation of materials in the processing of riveted compounds / B.L. Shtrikov, I.V. Malkina // Materials of the international STC «High technologies in mechanical engineering». – Samara: SSTU, 2005. – pp. 140-142.

Библиографическое описание статьи

Унянин А.Н., Хазов А.В. Исследование эффективности плоского шлифования с наложением ультразвуковых колебаний на заготовку // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 6 (146). – С. 55-62.

Reference to article

Unyanin A.N., Khazov A.V. Study of the efficiency of flat grinding with the application of ultrasonic vibrations to the workpiece. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 6 (146), pp. 55-62.