

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ЗАГОТОВКОЙ ПРИ НАЛОЖЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2018

А.Н. Унянин, доктор технических наук, доцент

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

А.В. Хазов, заместитель главного инженера

АО «Ульяновский механический завод», Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: шлифование; шлифовальный круг; ультразвуковые колебания; кинематика; абразивное зерно; механическая обработка заготовок.

Аннотация: Одним из эффективных средств повышения эффективности операций механической обработки заготовок является рациональное использование энергии ультразвуковых колебаний (УЗК). Для разработки рекомендаций по выбору направления и амплитуды УЗК в процессе шлифования выполнены исследования кинематики взаимодействия шлифовального круга с заготовкой. Предложены аналитические зависимости для расчета скорости перемещения абразивного зерна относительно заготовки, количества абразивных зерен, контактирующих с заготовкой, и параметра Ra шероховатости обработанной поверхности при шлифовании с УЗК. С использованием этих зависимостей выполнено численное моделирование для различных условий и режима шлифования. Установлено, что при наложении на заготовку колебаний в направлении, совпадающем с вектором рабочей скорости шлифовального круга, для уменьшения силы трения в зоне контакта круга с заготовкой необходимы колебания с частотой, выходящей за пределы частотного диапазона промышленных ультразвуковых установок. Наложение колебаний в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, приводит к существенному увеличению высотных параметров шероховатости этой поверхности. При наложении колебаний в направлении, совпадающем с осью круга, обеспечиваются минимальные высотные параметры шероховатости, а за счет прерывистого контакта зерен с заготовкой возможно снижение коэффициента трения, поэтому УЗК целесообразно накладывать в этом направлении. Для наложения колебаний на заготовку использовали устройство, в котором она закрепляется между излучателем колебаний и опорой и является одним из звеньев колебательной системы. Экспериментальные исследования, выполненные при плоском шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т, позволили установить, что наложение колебаний амплитудой $2A_z = 6 \dots 9$ мкм в направлении, совпадающем с осью круга, обеспечивают снижение сил шлифования на 10...15 %, износа круга на 25...40 %, параметра шероховатости Ra на 12...15 %.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей повышения эффективности операций механической обработки является наложение на элементы технологической системы колебаний ультразвуковой частоты. Использование ультразвуковых колебаний (УЗК) изменяет кинематику процесса резания [1; 2] и способствует снижению коэффициента трения в зоне контакта инструмента с заготовкой [3; 4]. Под влиянием УЗК интенсифицируются процессы проникновения смазочно-охлаждающих технологических средств в зону обработки и реализации ими своих технологических свойств [5; 6]. В результате снижается теплосиловая напряженность процесса [7; 8], повышается работоспособность инструмента и качество деталей [4; 9].

Значительное количество работ направлено на изучение кинематики шлифования [10; 11 и др.], однако лишь в немногих анализируется кинематика шлифования с наложением УЗК. В работе [12] рассматривается кинематика микрорезания единичными абразивными зернами (АЗ), приводится схема траектории движения абразивных зерен относительно заготовки. Аналитические зависимости, описывающие закономерности движения АЗ относительно заготовки при наложении УЗК, не приведены. Отсутствие аналитических исследований затрудняет разработку рекомендаций, касающихся использования УЗК (направление и амплитуда колебаний) для повышения эффективности процесса шлифования.

Цель исследования – разработка рекомендаций по выбору направления и амплитуды УЗК в процессе шлифования.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На заготовку могут быть наложены колебания в следующих направлениях [2; 13] (рис. 1): нормальные (в направлении оси y , перпендикулярной обрабатываемой поверхности), продольные (в направлении оси x , совпадающей с вектором рабочей скорости круга) и поперечные (в направлении оси z , совпадающей с осью круга). Однако наложение колебаний в любом направлении приводит к колебаниям заготовки и в направлениях, перпендикулярных распространению колебаний, за счет наличия сдвиговых волн [13]. Амплитуду колебаний в направлениях, перпендикулярных распространению колебаний, можно рассчитать как произведение амплитуды УЗК и коэффициента Пуассона. Для большинства сталей этот коэффициент равен $\mu = 0,3$, поэтому амплитуды колебаний, возникающих за счет распространения сдвиговых волн, достаточны для влияния на процесс шлифования.

Наложение колебаний в направлении оси x , совпадающей с вектором рабочей скорости шлифовального круга V_k , оказывает влияние на скорость перемещения АЗ относительно заготовки, которая может быть рассчитана по зависимости

$$V_{az}^x = V_k + \Delta V_x \cdot \cos \omega \cdot \tau,$$

где V_k – рабочая скорость круга, м/с;

ω – циклическая (круговая) частота колебаний, рад/с;

τ – время, с;

ΔV_x – амплитуда (максимальное значение) колебательной скорости частиц материала заготовки при наложении УЗК, м [14; 15].

$$\Delta V_x = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A_x,$$

где f – частота колебаний, 1/с;

A_x – амплитуда колебаний в направлении оси x .

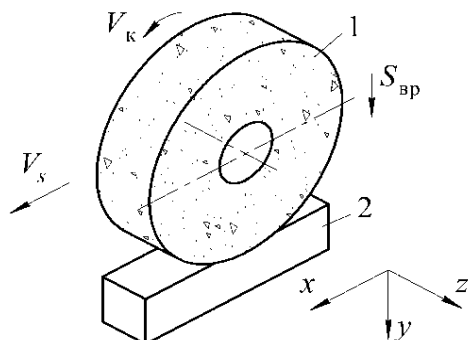


Рис. 1. Схема наложения колебаний на заготовку:
1 – шлифовальный круг; 2 – заготовка

Если амплитуда колебательной скорости $\Delta V_x < V_k$, то направление скорости движения АЗ относительно заготовки в любой момент времени совпадает с направлением рабочей скорости круга V_k , а сила трения АЗ о заготовку остается такой же, как и при отсутствии УЗК. Если $\Delta V_x > V_k$, то в течение части периода колебаний относительная скорость будет направлена в сторону, противоположную направлению V_k . В этом случае реализуется процесс прерывистого диспергирования материала заготовки абразивными зернами, поэтому эффективная сила трения уменьшается [1; 15].

Частота колебаний, достаточная для изменения направления скорости перемещения АЗ относительно заготовки, может быть определена из зависимости

$$f > \frac{V_k}{2 \cdot \pi \cdot A_x}.$$

При $A_x = 5 \cdot 10^{-6}$ м, $V_k = 35 \dots 120$ м/с данная частота должна быть $f > (1114 \dots 3821) \cdot 10^3$ Гц, что значительно превышает используемый частотный диапазон промышленных ультразвуковых установок, который составляет 18...40 кГц.

Когда частицы материала заготовки колеблются в направлении оси y , возможен прерывистый контакт АЗ с заготовкой, при котором сила трения действует в течение части периода их контакта, что приведет к ее снижению [1; 15]. Согласно [1] качественное изменение процесса взаимодействия АЗ с заготовкой достигается, когда время их контакта превышает четверть периода ультразвуковых колебаний. Учитывая зависимости для расчета времени и длины траектории контакта круга с заготовкой [10; 16], получено условие влияния УЗК на процесс взаимодействия АЗ с заготовкой на качественном уровне:

$$f \geq \frac{V_k}{4 \cdot \sqrt{D_k \cdot t}},$$

где D_k – диаметр шлифовального круга, м;
 t – глубина шлифования, м.

Например, при $D_k = 0,2$ м, $t = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м, $V_k = 35 \dots 120$ м/с минимальная частота УЗК, при которой имеет место качественное изменение процесса шлифования, составит $f = 6200 \dots 21255$ Гц. Используемый частотный диапазон промышленных УЗ установок превышает рассчитанный, поэтому качественное изменение процесса может быть достигнуто практически при всех условиях и режиме шлифования.

Максимальная глубина внедрения АЗ в заготовку при наличии колебаний в нормальном направлении равна

$$a_m^1 = a_m + A_y,$$

где a_m – глубина внедрения АЗ в заготовку при отсутствии колебаний [16; 17];

A_y – амплитуда колебаний в направлении оси y .

Число зерен, диспергирующих материал заготовки при шлифовании без колебаний, можно определить по зависимости [11; 18]:

$$z_{кр} = n_{зк} \cdot c_k \cdot \left(\frac{h_n + a_m}{d_0} \right)^\alpha,$$

где c_k и α – коэффициенты [11];

h_n – суммарная величина скалывания АЗ в процессе правки и его износа, м;

d_0 – средневероятный размер АЗ, м;

$n_{зк}$ – число зерен на поверхности круга, ограниченной размерами контактной зоны.

При шлифовании с наложением колебаний глубина залегания АЗ, диспергирующих материал заготовки, увеличивается на величину A_y , поэтому коэффициент, характеризующий увеличение количества АЗ при колебании частиц материала заготовки в направлении оси y , равен

$$k_z = \frac{(h_n + a_m + A_y)^\alpha}{(h_n + a_m)^\alpha}.$$

При следующих исходных данных: $a_m = 5 \cdot 10^{-6}$ м [17]; $h_n = 10 \cdot 10^{-6}$ м; $\alpha = 2,75$ [11; 18] – коэффициент $k_z = 1,65$ при $A_y = 3 \cdot 10^{-6}$ м и $k_z = 4$ при $A_y = 10 \cdot 10^{-6}$ м.

Поскольку при наложении УЗК сьем материала заготовки осуществляется большим количеством АЗ, на каждое из них приходится меньший объем диспергируемого материала, что позволяет прогнозировать меньший износ и засаливание зерен а следовательно, больший период стойкости круга. С увеличением амплитуды колебаний количество зерен, диспергирующих материал заготовки при колебании ее частиц в нормальном направлении, существенно увеличивается. Однако колебания частиц материала заготовки в направлении оси y могут привести к увеличению высотных параметров микрогеометрии обработанной поверхности за счет увеличения разновысотности АЗ круга [11; 18].

Очевидно, минимальные значения высотных параметров шероховатости могут быть достигнуты при наложении на заготовку УЗК в направлении, совпадающем

с осью шлифовального круга. Колебание частиц материала заготовки в этом направлении, как и шлифование с поперечной подачей, приводит к увеличению количества АЗ, формирующих микрорельеф заготовки [11], вследствие чего уменьшаются высотные параметры шероховатости. Однако при наложении на заготовку УЗК в направлении оси y за счет сдвиговых волн колебания в заготовке распространяются и в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, но с меньшей амплитудой ($A_y = A_z \cdot \mu$), что эквивалентно увеличению разноразностности АЗ.

Полагаем, что при колебании заготовки в направлении оси z число зерен, контактирующих с заготовкой, увеличивается на величину, равную отношению поперечного перемещения заготовки, приходящегося на один оборот шлифовального круга, к его высоте [11; 18], а разноразностность абразивных зерен увеличится на величину, равную амплитуде колебаний заготовки в нормальном направлении A_y . Поэтому зависимость, предложенная для расчета параметра Ra шероховатости шлифованной поверхности при плоском шлифовании периферией круга без поперечной подачи [11], при наложении на заготовку поперечных УЗК примет вид [19]

$$Ra_{yзк} = M_5 \cdot \left[\frac{(H_0 + A_y)^k}{n \cdot z_0 \cdot (1 + K_z) \cdot \left(\frac{V_k}{V_{сп}} \pm 1 \right) \cdot \sqrt{D_k}} \right]^{\frac{1}{k+m+0,5}}, \quad (1)$$

где H_0 – разноразностность активных АЗ круга, м [11; 18];

$V_{сп}$ – скорость продольной подачи, м/с;

M_5, k, m – коэффициенты;

$n = 6,43 \cdot d_0^{-0,14}$;

z_0 – число зерен, приходящихся на единицу рабочей поверхности шлифовального круга, $1/\text{м}^2$;

K_z – коэффициент, учитывающий увеличение числа зерен, контактирующих с заготовкой, при колебании ее в поперечном направлении. Знак «+» справедлив для встречного, а «-» для попутного шлифования.

$$H_0 = \frac{h_0}{\sqrt[k]{F(h_{ск})}}, \quad (2)$$

где h_0 – расстояние уровня скалывания абразивных зерен круга от наиболее выступающих вершин зерен, м;

$F(h_{ск})$ – функция распределения вершин зерен при значениях аргумента $h_{ск}$;

$h_{ск}$ – расстояние от вершин сколовшихся зерен до среднего уровня связи, м.

Для расчета коэффициента K_z предложена зависимость [19]

$$K_z = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_z \cdot D_k \cdot f}{H \cdot V_k}. \quad (3)$$

Адекватность зависимостей (1) и (3) доказана путем сравнения расчетных и экспериментальных значений параметра Ra шлифованных с наложением УЗК поверхностей деталей [19].

С использованием зависимостей (1)–(3) выполнен расчет параметра Ra при плоском шлифовании заготовок из стали 12Х18Н10Т ($\mu=0,3$) кругом 25А25(Ф60)ПСМ1(К)6К6(У) (в скобках приведены обозначения зернистости, твердости и связи круга по ГОСТ Р 52381) ($d_0=0,25$ м; $z_0=9,9 \cdot 10^6$ $1/\text{м}^2$ [16]) диаметром $D_k=0,2$ м без поперечной подачи. Режим шлифования: $V_k=35$ м/с; $V_{сп}=10$ м/мин= $0,17$ м/с. Высота шлифовального круга $H=0,02$ м. Правка круга осуществляется алмазным карандашом типа 01 со скоростью продольной подачи $0,3$ мм/мин и поперечной подачей $0,02$ мм/ход. Для данного случая при $h_{ск}/d_0=1,38$, $h_0=20 \cdot 10^{-6}$ м, $k=2,9$, $F(h_{ск})=0,57$ [11]. Расчеты выполнены для случая наложения на заготовку поперечных (в направлении оси z) и нормальных (в направлении оси y) колебаний частотой $18,6$ КГц и амплитудой 10 мкм (таблица 1).

При наложении на заготовку нормальных колебаний амплитудой $A_y=10$ мкм разноразностность зерен H_0+A_y увеличивается до $0,0343$ мкм; коэффициент K_z , учитывающий увеличение числа зерен, контактирующих с заготовкой, составил $0,2$, а параметр Ra увеличился до $2,29$ мкм. Наложение поперечных колебаний амплитудой $A_z=10$ мкм обеспечивает увеличение разноразностности зерен в меньшей степени – до $0,0273$ мкм, однако за счет увеличения коэффициента K_z до $0,67$ параметр Ra снизился до $1,8$ мкм.

Таким образом, при наложении на заготовку поперечных колебаний следует прогнозировать минимальные значения высотных параметров шероховатости обработанной поверхности. При этом амплитуда колебаний частиц материала заготовки в нормальном направлении A_y сопоставима со средними толщинами среза, которые по данным [17] при окончательном шлифовании составляют $3 \dots 6$ мкм при $V_k=40$ м/с и $2,6 \dots 4$ мкм при $V_k=80$ м/с, т.е. является достаточной, чтобы уменьшить коэффициент трения за счет прерывистого контакта АЗ с заготовкой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнены при шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т при наложении на заготовки поперечных колебаний частотой $18,6$ КГц с амплитудой $2A_z$, варьируемой в пределах $3 \dots 12$ мкм. Врезная подача составила $0,01$ мм/дв. ход. Остальные условия и элементы режима совпадают с теми, при которых рассчитывали параметр Ra . Для наложения УЗК на заготовку предложено устройство, в котором она закрепляется между излучателем колебаний и опорой и является одним из звеньев колебательной системы [20]. Плотный контакт излучателя с заготовкой позволяет минимизировать потери энергии УЗК и обеспечить высокую амплитуду колебаний заготовки (рис. 2).

С увеличением амплитуды УЗК до значения $2A_z=9$ мкм параметр Ra уменьшается, что можно объяснить увеличением числа зерен, контактирующих с заготовкой, в результате чего увеличивается коэффициент K_z . Наложение на заготовку УЗК с амплитудой 9 мкм привело к снижению параметра Ra на 23 %.

Минимальный износ круга после 80 двойных ходов зафиксирован при шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т с амплитудой УЗК $2A_z$, равной 6 и 9 мкм соответственно (рис. 3). Этот износ ниже на 42 и 24 %, чем при шлифовании без наложения УЗК.

Таблица 1. Результаты численного моделирования параметра Ra

Способ шлифования	Амплитуда колебания, мкм		Коэффициент K_z	Разновысотность АЗ, $H_0 + A_y$, мкм	Ra , мкм
	A_y	A_z			
Без наложения УЗК	0	0	0	0,0243	1,9
С наложением УЗК в направлении оси y , $A_y=10$ мкм	10	3	0,2	0,0343	2,29
С наложением УЗК в направлении оси z , $A_z=10$ мкм	3	10	0,67	0,0273	1,8

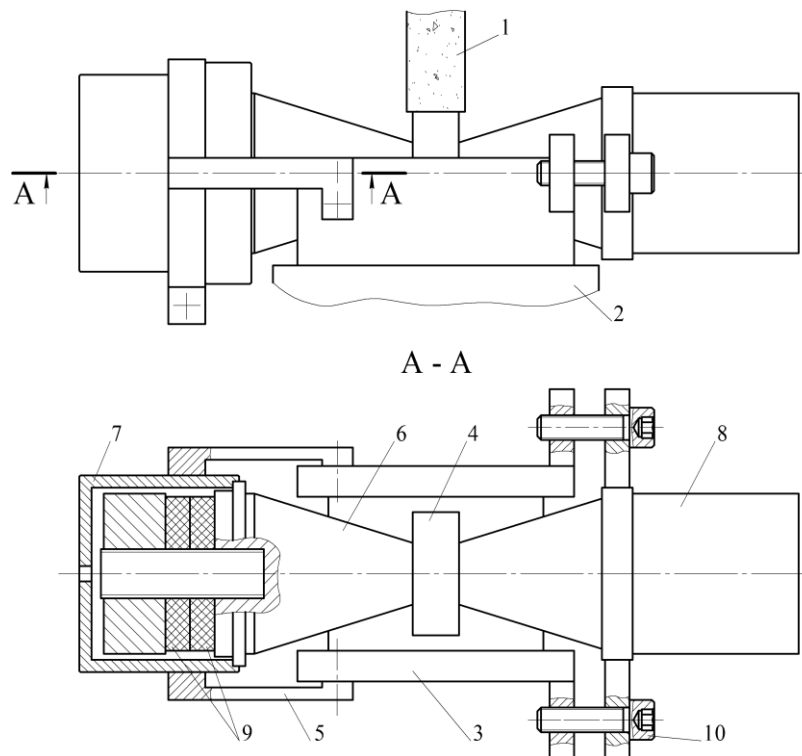


Рис. 2. Схема наложения УЗК на заготовку: 1 — шлифовальный круг; 2 — магнитная плита станка; 3 — рамка; 4 — заготовка; 5 — кронштейн; 6 — излучатель; 7 — корпус; 8 — опора; 9 — пьезопреобразователи; 10 — винты

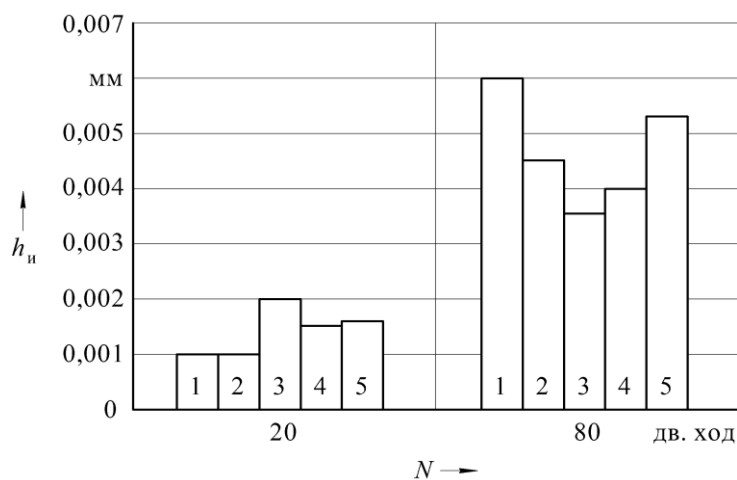


Рис. 3. Зависимость износа ШК h_u от числа двойных ходов N и амплитуды A_z УЗК, накладываемых на заготовку: 1 — без воздействия; 2 — $2A_z=3$ мкм; 3 — $2A_z=6$ мкм; 4 — $2A_z=9$ мкм; 5 — $2A_z=12$ мкм; материал заготовки — 3ХЗМ3Ф

При увеличении амплитуды колебаний до 12 мкм износ круга увеличивается. После выполнения 80 рабочих ходов составляющие силы шлифования с УЗК практически не увеличились и оказались ниже на 10...15 %, чем при шлифовании без УЗК [21].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Анализ кинематики взаимодействия абразивных зерен шлифовального круга с материалом заготовки при наложении УЗК в различных направлениях позволяет сделать следующие выводы:

– при наложении продольных (в направлении оси x) УЗК для изменения направления скорости АЗ относительно заготовки и уменьшения за счет этого силы трения в зоне контакта АЗ с заготовкой необходимы колебания с частотой, выходящей за пределы частотного диапазона промышленных УЗ установок, поэтому колебания в данном направлении накладывать нецелесообразно;

– наложение нормальных (в направлении оси y) колебаний значительно увеличивает количество АЗ, диспергирующих материал заготовки, что позволяет прогнозировать меньший износ и засаливание АЗ, а следовательно, больший период стойкости шлифовального круга, однако при этом формируются значительные высотные параметры микрогеометрии обработанной поверхности;

– при наложении на заготовку поперечных (вдоль оси z) колебаний обеспечиваются минимальные высотные параметры шероховатости, а амплитуда колебаний частиц материала заготовки в нормальном направлении является достаточной, чтобы уменьшить коэффициент трения за счет прерывистого контакта АЗ с заготовкой, поэтому накладывать колебания целесообразно в этом направлении.

Экспериментальные исследования показали, что накладывать на заготовку УЗК целесообразно в направлении оси круга с амплитудой $2A_z = 6...9$ мкм. При этом обеспечивается снижение сил шлифования на 10...15 %, износа круга на 25...40 %, параметра шероховатости Ra на 15 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. 353 с.
2. Агапов С.И., Сидякин Ю.И. Нарезание зубчатых колес с использованием ультразвука. Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. 148 с.
3. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
4. Нерубай М.С. Физико-механические методы обработки. Куйбышев: КуАИ, 1979. 92 с.
5. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса. М.: РАН, 2008. 250 с.
6. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием / под ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
7. Агапов С.И., Головкин В.В. Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука. Самара: СНЦ, 2010. 134 с.
8. Унянин А.Н. Влияние технологических факторов на локальные температуры при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний // Вектор науки

Тольяттинского государственного университета. 2016. № 1. С. 48–53.

9. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
10. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Ленингр. ун-т, 1981. 144 с.
11. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Сарат. ун-т, 1975. 191 с.
12. Tawakoli T., Azarhoushang B., Rabiey M. Ultrasonic-assisted grinding of soft steel // *Industrial Diamond Review*. 2009. № 1. P. 40–41.
13. Волгин М.Ф., Калашников В.В., Нерубай М.С., Штриков Б.Л. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
14. Балдев Р., Раджендран В., Паланиччи П. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 576 с.
15. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
16. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 298 с.
17. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 248 с.
18. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов: Сарат. ун-т, 1989. 191 с.
19. Унянин А.Н., Арзамасцев Я.А. Формирование микрогеометрии шлифованной поверхности при наложении на заготовку ультразвуковых колебаний // *Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XIX международной научно-технической конференции*. Т. 3. Донецк: ДонНТУ, 2012. С. 24–26.
20. Унянин А.Н., Терехин И.Ю. Способ плоского шлифования с наложением ультразвуковых колебаний: патент РФ № 2418671, 2008.
21. Унянин А.Н., Арзамасцев Я.А. Изнашивание шлифовального круга при наложении на заготовку ультразвуковых колебаний // *Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: материалы IV Международной научно-технической конференции*. Ч. I. Рыбинск: РГТУ имени П.А. Соловьева, 2012. С. 291–296.

REFERENCES

1. Poduraev V.N. *Obrabotka rezaniem s vibratsiyami* [Cutting with vibrations]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1970. 353 p.
2. Agapov S.I., Sidiyakin Yu.I. *Narezanie zubchatykh kolez s ispolzovaniem ultrazvuka* [Gear cutting using ultrasonic]. Volgograd, IUNL BolgGTU Publ., 2010. 148 p.
3. Markov A.I. *Ultrazvukovaya obrabotka materialov* [Ultrasonic processing of materials]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 237 p.
4. Nerubay M.S. *Fiziko-mekhanicheskie metody obrabotki* [Physical and mechanical processing methods]. Kuybyshev, KuAI Publ., 1979. 92 p.
5. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. *Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyakh kriticheskogo teplomassopereenosa* [Mechanical processing of blank parts in the circumstances of critical heat and mass transfer]. Moscow, RAN Publ., 2008. 250 p.

6. Khudobin L.V., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniem* [Lubricating and cooling technology tools and their use in machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.
7. Agapov S.I., Golovkin V.V. *Povysheniye effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki putem primeneniya ultrazvuka* [Efficiency improvement of mechanical treatment by means of ultrasonic application]. Samara, SNTs Publ., 2010. 134 p.
8. Unyanin A.N. The influence of technology factors on the local temperatures during the ultrasonically assisted grinding. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 1, pp. 48–53.
9. Kumabe D. *Vibratsionnoye rezaniye* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p.
10. Ostrovskiy V.I. *Teoreticheskiye osnovy protsessov shlifovaniya* [Theoretical background of grinding process]. Leningrad, Leningr. un-t Publ., 1981. 144 p.
11. Korolev A.V. *Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke* [Surface Formation in Tools and Components during Abrasive Machining]. Saratov, Sarat. un-t Publ., 1975. 191 p.
12. Tawakoli T., Azarhoushang B., Rabiey M. Ultrasonic-assisted grinding of soft steel. *Industrial Diamond Review*, 2009, no. 1, pp. 40–41.
13. Volgin M.F., Kalashnikov V.V., Nerubay M.S., Shtrikov B.L. *Primeneniye ultrazvuka i vzryva pri obrabotke i sborke* [Application of ultrasonic vibrations and explosion when processing and assembling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p.
14. Baldev R., Radzhendran V., Palanichami P. *Primeneniye ultrazvuka* [Application of ultrasound]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 576 p.
15. Golyamina I.P., ed. *Ultrazvuk. Malenkaya entsiklopediya* [Ultrasound. Small Encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1979. 400 p.
16. Khudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizatsiya zasalivaniya shlifovalnykh krugov* [Minimizing brining grinding wheels]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2007. 298 p.
17. Filimonov L.N. *Vysokoskorostnoye shlifovaniye* [High Speed Grinding]. Leningrad, Mashinostroenie, Leningr. otd-nie Publ., 1979. 248 p.
18. Korolev A.V. *Teoretiko-veroyatnostnyye osnovy abrazivnoy obrabotki* [Theoretical and Probabilistic Basis Abrasion]. Saratov, Sarat. un-t Publ., 1989. 191 p.
19. Unyanin A.N., Arzamastsev Ya.A. The formation of micro-geometry of grinded surface when applying the ultrasonic vibrations on a workpiece. *Mashinostroyeniye i tekhnosfera XXI veka: sbornik trudov XIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Donetsk, DonNTU Publ., 2012. Vol. 3, pp. 24–26.
20. Unyanin A.N., Terekhin I.Yu. *Sposob ploskogo shlifovaniya s nalozheniem ultrazvukovykh kolebaniy* [The technique of flat grinding with the ultrasonic vibrations applying], patent RF no. 2418671, 2008.
21. Unyanin A.N., Arzamastsev Ya.A. Abrasive wheel wear when applying ultrasonic vibrations on a workpiece. *Naukoemkiye tekhnologii v mashinostroyenii i aviadvigatelistroyenii: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Rybinsk, RGATU imeni P.A. Soloveva Publ., 2012. Ch. I, pp. 291–296.

THE STUDY OF KINEMATICS OF INTERACTION OF A GRINDING WHEEL WITH A WORKPIECE WHEN APPLYING ULTRASONIC VIBRATIONS

© 2018

A.N. Unyanin, Doctor of Sciences, Associate Professor
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)
A.V. Khazov, deputy chief engineer
JSC "Ulyanovsk Mechanical Plant", Ulyanovsk (Russia)

Keywords: grinding; grinding wheel; ultrasonic vibrations; kinematics; abrasive grain; mechanical processing of work materials.

Abstract: One of the effective means of improving the efficiency of the operations of work materials mechanical processing is the rational use of the ultrasonic vibrations energy (UVE). To develop the recommendations on the selection of the UVE direction and amplitude, within the grinding process, the study of the kinematics of interaction of a grinding wheel and a workpiece is carried out. The authors suggested the analytic dependences to calculate the velocity of displacement of an abrasive grain against a workpiece, the number of abrasive grains contacting with the workpiece, and the Ra parameter of surface roughness when grinding with the UVE. Using these dependencies, the numerical simulation for various conditions and grinding mode is carried out. It is determined that when applying vibrations to the workpiece in the direction coinciding with the vector of the operating velocity of a grinding wheel, to decrease the frictional force within the contact zone of a wheel with a workpiece, the vibrations with the frequency going beyond the frequency range of the industrial ultrasonic devices are required. The applying of vibrations in the direction perpendicular to the processed surface causes the significant increase in the altitude parameters of the roughness of this surface. When applying vibrations in the direction coinciding with the wheel axis, minimal altitude roughness parameters are achieved, and due to the intermittent contact of grains with the workpiece it is possible to decrease the friction ratio, consequently, it is reasonable to apply UVE in the same direction. To apply vibrations to a workpiece, the authors used the device where the workpiece is being fixed between the vibration sender and the bearer and is considered to be one of the parts of the vibrating system. The experimental study carried out when flat grinding of blank parts made of 3H3M3F and 12H18H10T steels allowed determining that the applying of vibrations with the amplitude of $2A_z = 6 \dots 9 \mu\text{m}$ in the direction coinciding with the wheel axis ensures the decrease in the grinding force by 10...15 %, wheel wear by 25...40 %, Ra roughness parameter by 12...15 %.