



Рис. 3. Проекты городских автомобилей особо малого класса (окончание)

#### Список литературы

1. Автомобили особо малого класса (квадрициклы) с гибридной энергосиловой установкой / В. А. Умняшкин [и др.] ; под общ. ред. В. А. Умняшкина. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2004. – 138 с.

2. Патент 84316 на полезную модель, Рос. Федерация : Транспортное средство МПК В60N 2/01 (2006.01), В62К 11/14 (2006.01) / Умняшкин В. А., Ившин К. С., Филькин Н. М., Савельев В. А. – № 2009106091/22 ; заявл. 20.02.2009 ; опубл. 10.07.2009. Бюл. № 19. – 1 с. : ил.

3. Патент 86532 на полезную модель, Рос. Федерация : Транспортное средство МПК В60К 5/08 (2006.01) / Умняшкин В. А., Ившин К.С., Филькин Н. М., Савельев В. А., Галеев И. И. – № 2009101648/22 ; заявл. 19.01.2009 ; опубл. 10.09.2009. Бюл. № 25. – 2 с. : ил.

4. Патент 73728 на промышленный образец, Рос. Федерация : Квадрицикл МКПО9 12-08 / Умняшкин В. А., Ившин К. С., Савельев В. А., Филькин Н. М. – № 2008504070 ; заявл. 07.11.2008 ; опубл. 16.01.2010. – 4 с. : ил.

5. Патент 73730 на промышленный образец, Рос. Федерация : Квадрицикл МКПО9 12-08 / Умняшкин В. А., Ившин К. С., Савельев В. А., Филькин Н. М. – № 2008504136 ; заявл. 14.11.2008 ; опубл. 16.01.2010. – 3 с. : ил.

*V. A. Umnyashkin*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

*K. S. Ivshin*, Candidate of Technical Sciences, Izhevsk State Technical University

*V. M. Ponomarev*, Candidate for a Degree, Tchaikovsky Technological Institute, Branch of Izhevsk State Technical University

*A. V. Polozov*, Postgraduate Student, Izhevsk State Technical University

#### Selection of Configuration for the Urban Automobile of Extra Small Class

*The criteria of a choice of the layout drawing, wheels, power units and rational passenger configuration of the extra small class urban automobile are determined.*

**Key words:** layout drawing, urban automobile, choice, criterion.

УДК 621.924.24

С. А. Шилиев, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АБРАЗИВНОЙ ЛЕНТЫ УСТРОЙСТВА РОТАЦИОННОГО ЛЕНТОЧНОГО ОХВАТЫВАЮЩЕГО ШЛИФОВАНИЯ

*Представлена методика для оценки работоспособности абразивной ленты устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования, позволяющая подобрать оптимальные технологические параметры процесса шлифования.*

**Ключевые слова:** машиностроение, шлифование, абразивная лента, абразивное зерно, качество.

Основой дальнейшего развития и совершенствования абразивной обработки является глубокое и всестороннее изучение физики процессов, протекающих в обрабатываемом изделии и инструменте.

Шлифование представляет собой статистический процесс комплексного воздействия режущей части абразивного инструмента, состоящей из большого числа отдельных режущих элементов на поверхностный слой обрабатываемого материала. При этом

процесс удаления припуска с помощью абразивного инструмента имеет ряд особенностей, существенно отличающих его от процесса резания металлическим инструментом [1].

Наибольшее влияние на работоспособность абразивного инструмента оказывают шлифовальные зерна, так как именно они являются главными участниками процесса резания. Между тем известно, что зерна далеко не полностью используют свои потенциальные возможности. Одна из основных причин низкой эффективности работы зерен состоит в том, что они имеют произвольную форму и расположение, как следствие – непредсказуемую и часто неблагоприятную для резания геометрию. Хаотическое расположение большого числа зерен на поверхности, отсутствие сплошной режущей кромки, различная геометрическая форма зерен и их жесткость обуславливают разнообразие видов стружки. Процесс снятия стружки происходит за очень короткий промежуток времени ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$  с). При этом многие зерна из-за неблагоприятной геометрии их режущих микроклиньев слабо либо вообще никак не участвуют в совокупном процессе резания. В результате многократного взаимодействия происходит затупление и выкрашивание режущих кромок, растрескивание и вырывание наиболее затупившихся зерен, образование наростов на поверхности абразива, заполнение пор металлической стружкой и отходами шлифования. Все это обуславливает снижение режущих свойств шлифовального инструмента.

Вопросам исследования формы и геометрии зерна в большей или меньшей степени занимались Маслов Е. Н., Пузанов В. В., Ваксер Д. Б., Коротков А. Н., Резников А. Н., Люкшин В. С. и др. При анализе формы и геометрии зерна возникает необходимость отыскания таких условий эксплуатации и параметров лент, которые позволили бы максимально повысить эффективность ленточного шлифования. При этом изучение работы единичного зерна открывает новые возможности при рассмотрении таких вопросов, как размеры среза, износа, силы резания, процесс износа и температура зоны контакта зерна с деталью и др.

Реальное абразивное зерно представляет собой многогранник неправильной формы с округленными вершинами. Зерна в абразивном инструменте удерживаются вследствие образования химического соединения между материалом связки и материалом зерна, сил адгезии и механического защемления зерен в связке. В абразивной ленте нет раздробленных зерен. Технологический процесс изготовления лент исключает силовое воздействие на абразивные зерна в момент формообразования инструмента, в то время как при изготовлении шлифовальных кругов перемешивание абразивной массы и прессование кругов сопровождается раздроблением части зерен.

В результате при одинаковом исходном гранулометрическом составе шихты содержание основной фракции абразивных зерен в лентах будет выше, чем в кругах, а технологические возможности шлифовального инструмента из шкурки с ориентированным

расположением абразивных зерен значительно шире [2, 3, 4 и др.].

Характерной особенностью ленты как инструмента является однослойное расположение абразивных зерен в слое связки. В этой связи особо важна проблема длительного сохранения их работоспособности для обеспечения эффективной работы абразивной ленты. В процессе шлифования лента, являясь упругой системой, подвергается упругому и пластическому деформированию (удлинению и др). В зоне обработки под действием радиальной силы резания определенный участок ленты может подвергаться сжатию, увлекая шлифующие зерна, которые в определенных пределах могут отклоняться по вертикали и горизонтали, т. е. эластичность и упругость связки при ленточном шлифовании позволяют зернам под действием нагрузки перемещаться относительно друг друга и принимать благоприятное для резания положение. При выходе ленты из контакта с деталью зерна занимают исходное положение. Подобное деформирование способствует увеличению числа эффективных режущих зерен и более равномерному распределению нагрузки между зернами в зоне контакта.

В основе изнашивания абразивных лент лежат те же физико-механические и химические процессы, что и при шлифовании кругами [4, 5, 6, 7]. Однако, учитывая особенности процесса ленточного шлифования, изнашивание абразивных лент также имеет свои особенности. Износ абразивного инструмента является следствием истирания и выкрашивания абразивных зерен и связки под действием механических сил, температурных напряжений и возникающих в зоне шлифования процессов адгезии и диффузии. Ввиду кратковременности воздействия высокой температуры на абразивные зерна глубина проникновения тепловой волны невелика, поэтому выкрашивание зерен наблюдается в тонком поверхностном слое.

Таким образом, исследование закономерностей стружко- и формообразования поверхностей при шлифовании невозможно без учета упругих перемещений абразивных зерен. Характер взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью во многом определяется жесткостью его опоры. Определению ее величины и влияния на нее технологических факторов посвящен целый ряд работ. В работе [8] приводятся некоторые результаты исследований величины жесткости опоры абразивных зерен круга, выполненных в процессе шлифования. Однако количественных характеристик упругих радиальных и угловых перемещений зерен при ротационном ленточном охватывающем шлифовании нет.

Жесткость опоры зерна определяется двумя параметрами: силой, действующей на зерно при срезании им стружки, и его радиальным отжатием под действием этой силы.

Разницу в величинах статической жесткости опоры зерна и жесткости, измеренной в процессе шлифования, можно объяснить тем, что при статическом измерении нагрузка прикладывается к одному зерну, а при измерении в процессе шлифования – к группе зерен,

вследствие чего уменьшается влияние межзерновых связей. Следует отметить, что в процессе шлифования зёрна способны воспринимать большие нагрузки, чем в статике, без заметного их разрушения [8].

Статическую жесткость опоры абразивного зерна в абразивной ленте можно условно разложить на две составляющие: статическая жесткость клеевой связки и статическая жесткость тканевой основы.

С увеличением натяжения ленты статическая жесткость опоры абразивного зерна вначале возрастает, а при достижении определенного значения начинает падать. Это объясняется тем, что с увеличением натяжения ленты увеличивается нормальная составляющая силы резания, при этом тканевая основа ленты уплотняется, т. е. увеличивается одна из составляющих – статическая жесткость тканевой основы, и, соответственно, увеличивается общая жесткость опоры абразивного зерна. При дальнейшем увеличении натяжения ленты тканевая основа ее вытягивается настолько, что начинает разрушаться клеевая связка, удерживающая абразивное зерно на ткани, при этом статическая жесткость клеевой связки понижается, так как жесткость клеевой связи выше, чем жесткость тканевой основы, несмотря на то, что статическая жесткость тканевой основы с увеличением натяжения ленты увеличивается, суммарная составляющая понижается.

С увеличением натяжения ленты относительное удлинение ее возрастает по линейному закону, при этом клеевая связка, обладающая эластичными свойствами, растягивается вместе с тканевой основой. При достижении определенного значения на клеевой связке начинают появляться трещины, разбивающие абразивный слой ленты на отдельные блоки, при этом кривая относительного удлинения ленты начинает возрастать более интенсивно. При дальнейшем увеличении натяжения ленты увеличивается количество трещин на клеевой связке, уменьшаются размеры блоков, появляются микротрещины между отдельными зёрнами в блоке, что характеризует уменьшение статической жесткости.

По результатам проведенных исследований известно:

- статическая жесткость опоры абразивного зерна в ленте в 10...15 раз ниже статической жесткости опоры зерна в шлифовальном круге;
- статическая жесткость опоры абразивного зерна зависит от усилия натяжения ленты, при этом достигает максимального значения при натяжении ленты 7 кгс/см, что соответствует оптимальному значению;
- максимальную производительность при данном натяжении можно объяснить тем, что в этой точке статическая жесткость опоры зерна имеет максимальное значение, а значит, зерно внедряется в металл в процессе шлифования на максимальную глубину, что одновременно приводит к увеличению сил резания и повышению шероховатости поверхности;
- максимальная стойкость ленты при натяжении ленты 7 кгс/см объясняется тем, что клеевая связка ленты не имеет трещин и обеспечивает высокую прочность крепления зерна.

Проведенные исследования показали, что приработка ленты при ротационном ленточном охватывающем шлифовании на средних режимах происходит в пределах 10 минут. В этот период вырываются непрочно закрепленные, скальваются островершинные зерна, образуются площадки с микро- и субмикровершинами. Дальнейший, стабилизировавшийся процесс шлифования происходит с постепенным увеличением размеров площадки. Ухудшение условий резания приводит к повышению сил и, следовательно, к увеличению упругих перемещений зерна.

Для оценки работоспособности абразивной ленты устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования с учетом упругого смещения зерен был проведен комплекс исследований на основании разработанной методики, алгоритм которой представлен на рис. 1.

Для обеспечения работы абразивной ленты в условиях наименьшего износа необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$P' < [P], \quad (1)$$

где  $[P]$  – допустимая нагрузка на одно абразивное зерно, которая может быть определена по следующей формуле:

– критическая нагрузка, соответствующая началу выкрашивания зерна электрокорунда,

$$[P]^B = 0,63X_n^{0,5}, \quad (2)$$

где  $X_n$  – средний размер зерна, мм.

– критическая нагрузка, соответствующая объемному разрушению зерна электрокорунда,

$$[P]^O = 5,6X_n + 0,58X_n^2, \quad (3)$$

для абразивной ленты зернистостью 40 получаем:

$$[P]^B = 3,98 \text{ Н}; [P]^O = 23,3 \text{ Н}.$$

Для определения нагрузки на зерно, возникающей в процессе работы, воспользуемся следующей формулой:

$$P' = \frac{\delta P_y}{z^p F_k}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения нагрузки по площади контакта, 1,0–2,0;  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $z^p$  – число режущих зерен на единице поверхности контакта, шт.;  $F_k$  – площадь контакта инструмента и заготовки, мм<sup>2</sup>.

При определении количества зерен на поверхности контакта возникают определенные сложности, обусловленные отсутствием единой методики по расчету числа зерен. По результатам расчетов многих исследователей, как теоретических, так и практических, количество зерен на единице площади абразивного инструмента находится в пределах 1,5...7. Однако в этих исследованиях не учитывается упругое перемещение абразивного зерна под действием сил резания.

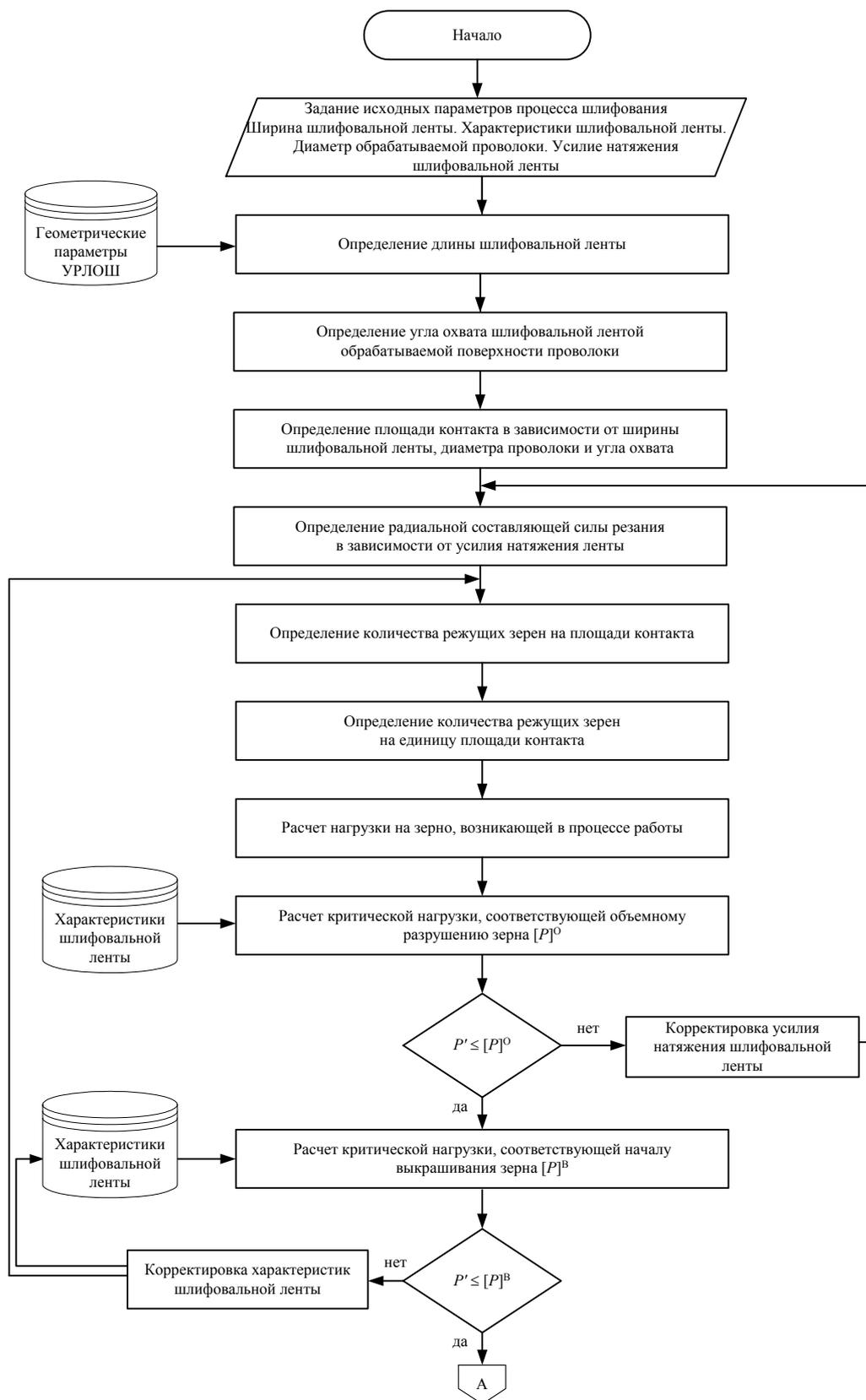


Рис. 1. Блок-схема методики оценки работоспособности абразивной ленты устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования

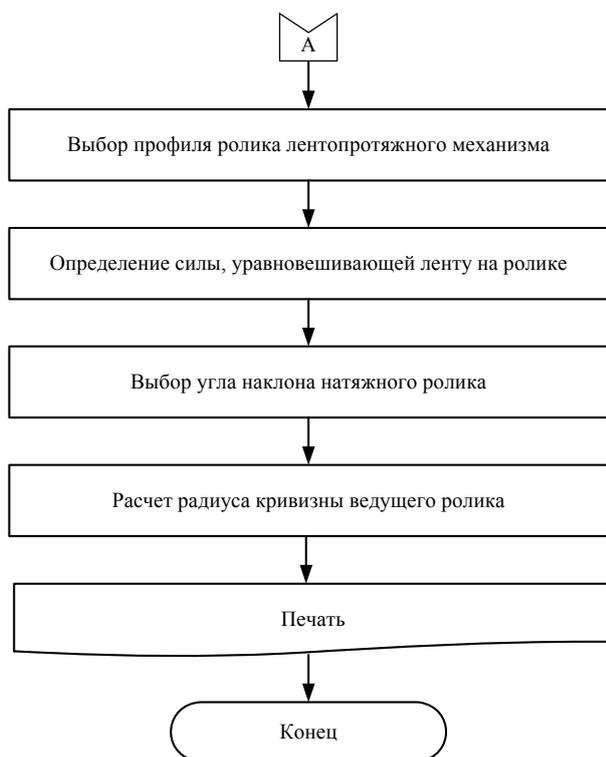


Рис. 1. Блок-схема методики оценки работоспособности абразивной ленты устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования (окончание)

Рассмотрим, чем обуславливается упругое перемещение абразивного зерна в процессе работы. Под действием сил резания в абразивном круге возникают упругие перемещения зерен, величина которых соизмерима с глубиной его внедрения в металл, следовательно, жесткость опоры абразивного зерна играет важную роль в процессе формообразования шлифованной поверхности. С увеличением нагрузки на зерно жесткость опоры зерна увеличивается, то есть упругую связку можно уподобить пружине с переменной жесткостью [3].

На абразивное зерно в процессе работы действуют силы резания  $P_y'$  и  $P_z'$ , равнодействующая которых определяется из

$$\vec{P}' = \vec{P}_y' + \vec{P}_z'. \quad (5)$$

Под действием силы  $P_y$  абразивное зерно на упругом тканевом основании в процессе шлифования перемещается в радиальном направлении на величину  $\Delta P_y$  в радиальном направлении, а от силы  $P_z'$  поворачивается вокруг своего мгновенного центра и смещается в радиальном направлении на величину  $\Delta P_z$ . При этом с увеличением радиальной составляющей увеличивается и количество зерен в пятне контакта. Это объясняется тем, что при наличии упругой опоры зёрна под действием сил шлифования перемещаются в радиальном направлении, при этом вступают в работу нижележащие зёрна. В первое время количество зерен на единице площади контакта быстро увеличивается, а с дальнейшим увеличением времени шлифования рост количества зерен замедля-

ется. Теоретическая траектория движения абразивного зерна будет по линии  $ABC$ , но за счет упругого смещения она пройдет по линии  $ADC$  (рис. 2).

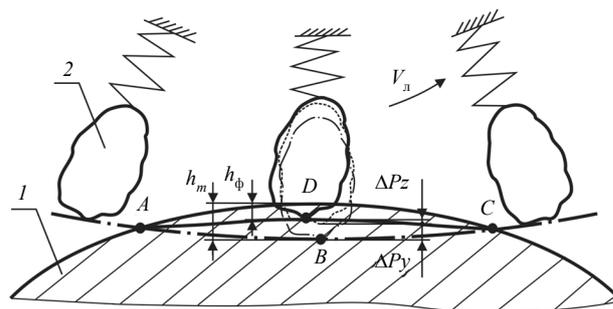


Рис. 2. Схема резания при упругом отжатии зерна: 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – абразивное зерно

Суммарное перемещение зерна

$$\Delta = \Delta P_y + \Delta P_z. \quad (6)$$

Следовательно, для оценки глубины резания абразивного зерна необходимо учесть его смещение под действием сил резания. Теоретическая глубина резания определяется как сумма фактической глубины и величины упругого перемещения зерна [5, 8]:

$$t_r = t_\phi + \frac{P_y'}{C_D}, \quad (7)$$

где  $C_D$  – коэффициент динамической жесткости.

Вопросами жесткости опоры абразивного зерна занимались авторы [8], где путем анализа графических зависимостей установлено, что статическая жесткость опоры зерна для кругов на керамической связке находится в пределах 500...600 Н/мм.

Соотношение статической и динамической жесткости исследовано в работе [3], где показано, что жесткость опоры зерна в динамике в 2...3 раза ниже, чем в статике. Это объясняется тем, что в статике нагрузка прикладывается к одному зерну, а в динамике – к группе зерен. По данным различных исследований известно, что жесткость опоры зерна в абразивной ленте существенно отличается от жесткости опоры зерна в шлифовальном круге, установлено, что коэффициент динамической жесткости зерна в ленте, натянутой на резиновый бандаж, равняется 24 Н/мм.

Известные формулы для расчета числа режущих зерен учитывают зернистость и разновысотность зерен инструмента, но без учета упругого перемещения абразивного зерна:

$$z^p = ze^{-x} = \frac{10^4}{X_n} e^{\frac{x}{2X_n} - 3}, \quad (8)$$

где  $z$  – общее число зерен на единице площади, шт.

Для определения максимального количества зерен на единице площади воспользуемся условием плотного прилегания сферических тел:

$$z = \frac{1}{\pi X_n^2}. \quad (9)$$

В показатель степени вводим значение, учитывающее упругое перемещение зерна в процессе шлифования, численные коэффициенты получены путем экспериментальных исследований:

$$z^p = \frac{1}{\pi X_n^2} e^{\left(\frac{t_\phi}{0,2X_n} + \frac{P_y}{0,2X_n C_D F_k}\right)^{-2,5}}. \quad (10)$$

Таким образом, формула (4) для определения нагрузки на абразивное зерно будет иметь вид

$$P' = \frac{\delta P_y}{\left(\frac{1}{\pi X_n^2} e^{\left(\frac{t_\phi}{0,2X_n} + \frac{P_y}{0,2X_n C_D F_k}\right)^{-2,5}}\right) F_k}. \quad (11)$$

Результаты расчета представлены в таблице. С целью проверки и уточнения коэффициентов формулы для расчета числа абразивных зерен на единице поверхности ленты были проведены экспериментальные исследования по методике [5].

#### Результаты расчета (для зернистости 40 и $F_k = 65,17 \text{ мм}^2$ )

$P_H, \text{ Н}$	50	60	70	80	90	100
$P_y, \text{ Н}$	26,3	31,5	36,7	41,9	47,2	52,5
$P', \text{ Н}$	2,66	3,08	3,45	3,78	4,1	4,42
$Z_p, \text{ шт.}$	0,303	0,314	0,326	0,340	0,353	0,365
$Z_p/F_{k_2}$ шт./мм <sup>2</sup>	19,774	20,455	21,275	22,169	23,024	23,756

В результате проведенных исследований по разработанной методике было выявлено следующее:

- процесс стружко- и формообразования при шлифовании на устройстве ротационного ленточного охватывающего шлифования определяется как макрогеометрией вершины зерна, так и его упругими перемещениями;

- при малых нагрузках на ленту износ ее абразивного слоя носит характер засаливания с частичным истиранием выступающих вершин абразивных

зерен. При увеличении глубины резания вследствие увеличения натяжения ленты повышается эффективность процесса резания;

- наибольшее влияние на количество активных абразивных зерен на единице площади режущей поверхности шлифовальной шкурки оказывает сила радиальная составляющая силы резания;

- при анализе работоспособности абразивной ленты с учетом упругого смещения зерна выявлено, что оптимальное значение сил резания обеспечивается при приложении усилия натяжения в диапазоне 60–80 Н;

- полученные величины нагрузки на единичное зерно меньше допустимого значения величины объемного разрушения зерен, при натяжении ленты с усилием больше 80 Н начинается процесс выкрашивания частиц зерен.

#### Список литературы

1. Резников А. Н. Абразивная и алмазная обработка : справочник. – М. : Машиностроение, 1977. – 389 с.
2. Люкин В. С. Исследование формы шлифовальных зерен // Обработка металлов. – 2004. – № 3(24). – С. 15–16.
3. Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
4. Паньков Л. А., Костин Н. В. Обработка инструментами из шлифовальной шкурки. – Л. : Машиностроение, 1988. – 234 с.
5. Шильяев С. А. Теоретические предпосылки оценки работоспособности абразивной ленты при обработке в условиях интенсивного нагружения // Материалы Всерос. науч.-технич. конф. «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2002». – Пермь : ПГТУ, 2002. – С. 270.
6. Лурье Г. Б. Шлифование абразивными лентами. – М. : Высш. шк., 1980. – 47 с.
7. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с. : ил.
8. Зенков Б. Н., Трифонов О. А. Определение жесткости опоры зерна абразивного круга в процессе шлифования // Совершенствование процессов обработки металлов резанием. – 1975. – № 6. – С. 43–48.

S. A. Shilyaev, Candidate of Technical Sciences, Izhevsk State Technical University

#### Study of Performance of Abrasive Belt of Rotary Band Grinding Device

An evaluation technique of performance of abrasive belt of rotary band grinding device that provides optimum technological parameters of the grinding process is presented.

**Key words:** mechanical engineering, grinding, grinding belt, abrasive grain, quality.