

Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Производительность процесса при обработке кромок деталей полимерно-абразивными щетками // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 29–36. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.04

Dimov Yu.V., Podashev D.B. Process performance when machining part edges with polymer-abrasive brushes. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 29–36. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.04

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 3, 2020**

**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.04  
УДК 621.923: 621.922

**Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев**

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск, Россия

**ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРИ ОБРАБОТКЕ КРОМОК ДЕТАЛЕЙ**  
**ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ ЩЕТКАМИ**

Рассмотрен способ обработки кромок полимерно-абразивными щетками, который позволяет решить проблему механизации и автоматизации ручного труда, применяемого в настоящее время при выполнении подобных операций. Решение этой проблемы для отечественной промышленности является весьма актуальной задачей.

При исследованиях использовались щетки компании 3M марок С ВВ-ZB с изогнутыми ворсинками и А ВВ-ZB с прямыми ворсинками.

На основе изучения взаимодействия режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью разработана математическая модель формирования размера обработанной кромки в зависимости от режимных параметров обработки.

При этом режущий микрорельеф характеризуется следующими параметрами:  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение профиля,  $m$  – число максимумов и  $n(0)$  – число нулей (пересечений средней линии).

Для аналитического определения размера кромки рассчитан объем материала, который необходимо удалить в процессе обработки путем резания единичными абразивными зёрнами. Для этого определено количество зёрен, участвующих в контакте, и глубина их внедрения, а также смоделирован процесс стружкообразования единичным зёрном, который представлен в виде конуса с закругленной вершиной. Установлено, что производительность процесса обработки (съём материала) зависит от количества зёрен, участвующих в резании, глубины их внедрения, радиуса при вершине зёрна и механических свойств обрабатываемого материала.

Радиус на вершинах зёрен определен экспериментально, поскольку он зависит от уровня сближения режущего микрорельефа и обрабатываемой поверхности, которое, в свою очередь, зависит от нормальной составляющей силы резания, а соответственно, от режимных параметров обработки: деформации щетки  $\Delta Y$ , скорости резания  $V$  и подачи  $S$ .

Прочность поверхностного слоя существенно отличается от прочности остального материала обрабатываемой детали и зависит от конкретных условий деформации, типа среды, предыстории обрабатываемого материала и т.д. В связи с этим введен и экспериментально определен коэффициент, учитывающий глубину внедрения абразивных зёрен в обрабатываемый материал, для материалов В95пчТ2 и ВТ20 и представлен в виде уравнения регрессии.

Экспериментальные исследования показали, что теоретические положения полностью подтверждаются экспериментальными данными. Установлено, что полимерно-абразивные щетки могут эффективно применяться для обработки кромок деталей. Из всех исследованных щеток рекомендуются С ВВ-ZB P120 и А ВВ-ZB P50, как наиболее производительные.

**Ключевые слова:** размер кромки, щетка, режущий микрорельеф, модель единичного зёрна, радиус закругления, сближение, глубина внедрения, площадь стружки, съём материала, полимерно-абразивный инструмент.

**Yu.V. Dimov, D.B. Podashev**

Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation

**PROCESS PERFORMANCE WHEN MACHINING PART EDGES**  
**WITH POLYMER-ABRASIVE BRUSHES**

The article discusses a method of processing edges with polymer-abrasive brushes, which allows to solve the problem of mechanization and automation of manual labor, which is currently used in such operations. The solution of this problem for domestic industry is a very urgent task.

In the research we used 3M brushes of grades С ВВ-ZB with curved bristles and А ВВ-ZB with straight bristles.

Based on the study of the cutting microrelief interaction with the machined surface, a mathematical model has been developed for forming the size of the machined edge depending on the processing parameters.

In this case, the cutting microrelief is characterized by the following parameters:  $\sigma$  – the mean square deviation of the profile,  $m$  – the number of maxima and  $n(0)$  – the number of zeros (intersections of the midline).

For analytical determination of the edge size, the volume of material is calculated that must be removed during processing by cutting with single abrasive grains. To do this, the number of grains participating in the contact and the depth of their introduction are determined, and the chip formation process by a single grain, which is presented in the form of a cone with a rounded top, is simulated. It was established that the productivity

of the processing process (material removal) depends on the number of grains involved in cutting, the depth of their introduction, the radius at the top of the grain and the mechanical properties of the processed material.

The radius at the tops of the grains was determined experimentally, since it depends on the level of convergence of the cutting microrelief and the surface being machined, which, in turn, depends on the normal component of the cutting force, and, accordingly, on the processing parameters: brush deformation  $\Delta Y$ , cutting speed  $V$  and feed  $S$ .

The strength of the surface layer differs significantly from the strength of the rest of the material of the workpiece and depends on the specific conditions of deformation, the type of medium, the history of the processed material, etc. In this regard, a coefficient was introduced and experimentally determined that takes into account the depth of penetration of abrasive grains into the processed material for materials V95pчT2 and VT20 and is presented in the form of a regression equation.

Experimental studies have shown that theoretical principles are fully supported by experimental data. It has been established that polymer-abrasive brushes can be effectively used to process the edges of parts. Of all the brushes examined, C BB-ZB P120 and A BB-ZB P50 are recommended as the most productive.

**Keywords:** edge size, brush, cutting microrelief, single grain model, radius of curvature, rapprochement, penetration depth, chip area, material removal, polymer-abrasive tools.

Вопросам оценки производительности процесса и качества изделий после различных видов механической обработки посвящено множество работ, например работы [1–8]. Тем не менее в настоящее время многие финишные операции, такие как зачистка поверхностей и скругление острых кромок, продолжают выполняться при помощи низкопроизводительного ручного труда. Одним из перспективных и практически неисследованных способов, способных эффективно решать вышеуказанную проблему, является обработка вращающимися инструментами на гибкой (полимерной) связке. В связи с изложенным можно констатировать, что проблема замены ручного труда на механизированный и автоматизированный труд с применением полимерно-абразивных щеток для отечественной промышленности является весьма актуальной.

При исследованиях использовались щетки компании ЗМ марок С ВВ-ZB с изогнутыми ворсинками и А ВВ-ZB с прямыми ворсинками, характеристики которых подробно описаны в работе [9]. Данные щетки выпускаются в виде тонких дисков толщиной 1,5 мм из полимерного материала с гибкими ворсинками (135 для типа С и 90 для типа А) по окружности.

### Параметры, характеризующие производительность процесса

Оцениваются в поперечном сечении кромки (рис. 1). К ним относятся [10]: фактический радиус скругления кромки, количество материала, снятого при скруглении кромки, и размер кромки  $Z_k = 0,5(X + Y)$ .

При обработке эластичными полимерно-абразивными щетками формулу съема материала с кромки длиной  $l$  можно записать следующим образом:

$$Q = N_D Q_c T n, \quad (1)$$

где  $n$  – частота вращения щетки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $T$  – время обработки,  $\text{мин}$ ;  $T = \frac{l+B}{S}$ ;  $l$  – длина обрабатываемой кромки,  $\text{мм}$ ;  $B$  – ширина щетки,  $\text{мм}$ ;  $Q_c$  – объем

материала кромки, срезаемый щеткой шириной 1 мм за один оборот:

$$Q_c = S_c N N_B \Delta Y b x, \quad (2)$$

где  $S_c$  – площадь поперечного сечения стружки на единичном зерне [11];  $N_B$  – количество ворсин на всей окружности на ширине щетки 1 мм;  $\Delta Y$  – деформация щетки (длина участка ворсины, участвующая в резании);  $b$  – ширина ворсины в зоне контакта с кромкой;  $x$  – путь прохождения ворсиной в состоянии контакта с кромкой;  $N$  – количество зерен, находящихся в контакте на площади 1  $\text{мм}^2$ , в соответствии с формулой [12]

$$N = \frac{\pi n^2(0)}{2\sqrt{2\pi}} \cdot \gamma e^{-0,5\gamma^2}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – относительное сближение средних линий  $m_1 m_1$  и  $m_2 m_2$  (рис. 2);  $n(0)$  – число нулей (число пересечений средней линии). Следует отметить, что, согласно работам [11–14], кроме этого параметра предусмотрены:  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение профиля,  $m$  – число максимумов, характеризующих режущий микрорельеф.

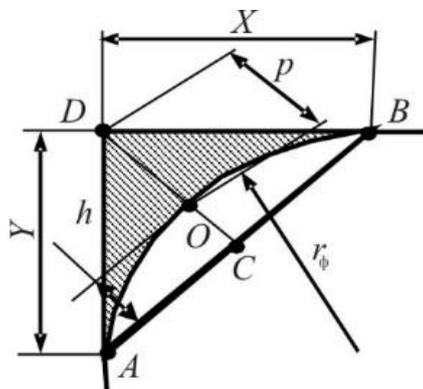


Рис. 1. Схема к расчету площади  $Q_c$

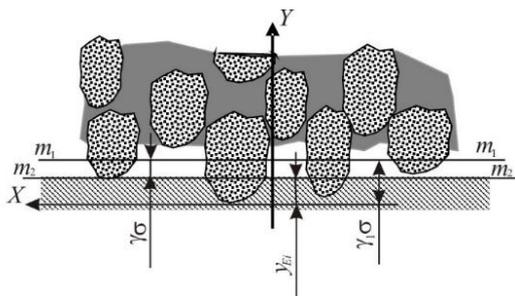


Рис. 2. Схема взаимодействия режущего микрорельефа с поверхностью детали

**Аналитическое определение размера кромки ( $Z_k = 0,5(X + Y)$ )**

Обработанная кромка в зависимости от конструкции щетки может быть в виде фаски  $ACB$  (см. рис. 1) или закругленной по радиусу  $r_\phi$ .

Кромка в виде фаски. При  $x = AB$  треугольника  $ABD$  величина переменная и зависит от  $Z_k = 0,5(X + Y)$ :

$$x = \int_0^{Z_k} dx = \int_0^{Z_k} \sqrt{2}dZ = \sqrt{2}Z_k. \quad (4)$$

Подставив формулу (4) в формулу (2), получим

$$Q_c = S_c NN_B \Delta Y b \sqrt{2} Z_k. \quad (5)$$

При  $X = Y = Z_k$  объем материала, который подлежит снятию с кромки,

$$Q = \frac{Z_k^2}{2} l. \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (1), (5) и (6), получим

$$Z_k = 2,828 S_c NN_B \Delta Y b N_D \frac{n}{S},$$

где  $Z_k$  численно равен объему снятого материала на ширине 1 мм.

Кромка, закругленная по теоретическому радиусу  $r_\tau$ . При  $x = AOD$

$$h = r_\tau \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) = 293r_\tau; a = 2\sqrt{2hr_\tau - h^2} = 1,414r_\tau 293r_\tau.$$

$$\text{При } r_\tau = Z_k \quad x = \sqrt{a^2 + \frac{16}{3}h^2} = 1,567Z_k. \quad (7)$$

Уравнение примет вид  $Q_c = S_c N N_B \Delta Y b 1,567Z_k$ .

Решая совместно уравнения (1), (2) и (7), получим

$$Z_k = 7,302 S_c NN_B \Delta Y b N_D \frac{n}{S}.$$

**Площадь поперечного сечения стружки на единичном зерне  $S_c$**

По аналогии с работой [11] в качестве модели единичного зерна принят конус со скругленной вершиной. При внедрении зерна впереди него образуется валик наплыва (рис. 3), который при определенных условиях может переходить в стружку. Пластически оттесненный материал, обтекая зерно без отделения от основной массы, образует наплыв по его боковым сторонам [11].

На рис. 3 приняты обозначения:  $y_E$  – глубина внедрения зерна;  $mg$  – участок, на котором происходит стружкообразование;  $D$  – точка перехода сферической части в коническую;  $mk$  и  $gn$  – участки, на которых при движении зерна материал пластически оттесняется в наплыв.

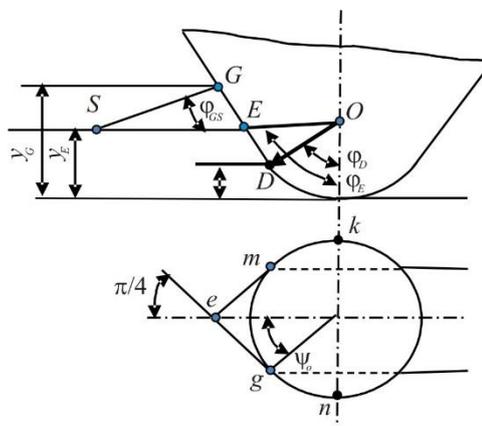


Рис. 3. Взаимодействие модели единичного зерна с обрабатываемой поверхностью

Площадь поперечного сечения стружки на единичном зерне, по данным работы [11],

$$S_c = 2r_3^2 \sin \psi_0 (A_E - A_O) \text{ при } y_E \leq y_D;$$

$$S_c = 2r_3^2 \sin \psi_0 [A_D + A_O + \Delta \epsilon (0,5 \Delta \epsilon \text{ctg} \phi_D + \sin \phi_D)] \text{ при } y_E > y_D,$$

где  $r_3$  – эквивалентный радиус закругления абразивного зерна и микронеровности обрабатываемой поверхности;  $\psi_0$  – угол заторможенного участка на сферическом абразивном зерне.

$$\psi_0 = \pi/4 - 0,5 \arccos 2\mu_T \quad (\text{при } \mu_T = 0,4 \quad \psi_0 = 0,46365 \text{ рад}).$$

Здесь  $AE = 0,5\phi_E - 0,25\sin 2\phi_E$ ;  $\phi_E = \arccos(1 - \epsilon_E)$ ;  $\epsilon_E = y_E/r_3$ ;  $AO = 0,5\phi_0 - 0,25\sin 2\phi_0$ ;

$$\phi_0 = 0,5 \arccos 2\mu_T \quad (\text{углы } \phi_E \text{ и } \phi_0 \text{ в радианах});$$

$$AD = 0,5\phi_D - 0,25\sin 2\phi_D;$$

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_E - \varepsilon_D; \varepsilon_D = y_D / r_l; y_D = r_l(1 - \sin \varphi_D).$$

При  $\varphi_D = 45^\circ = 0,7854$  рад  $y_D = 0,293 r_l$ .

Здесь  $r_l$  – средний радиус кривизны вершин выступов режущего микрорельефа эластичного полимерно-абразивного круга;  $y_E$  – математическое ожидание глубины внедрения выступов зерен, пластически деформирующих материал:

$$y_E = \sigma[\gamma_0 - \gamma], \quad (8)$$

где  $\gamma_0$  – математическое ожидание относительных высот максимумов;  $\gamma_0 = \gamma^{0,802} + 0,97$ .

Для определения  $y_E$  необходимо воспользоваться зависимостями составляющих сил резания для единичного зерна.

Нормальная  $P_y^1$  и тангенциальная  $P_z^1$  составляющие силы резания на единичном зерне определяются по выражениям

$$P_y^1 = K r_3^2 f_y; P_z^1 = K r_3^2 f_z,$$

где  $K$  – предел текучести на сдвиг;  $f_y$  и  $f_z$  – безразмерные коэффициенты сил, формулы для расчета которых приведены в аппроксимированном виде в работе [11]:

$$f_y = 14,387 \varepsilon_E^{0,895}; f_z = 7,1 \varepsilon_E, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_E$  – относительная величина внедрения зерен,  $\varepsilon_E = y_E / r_3$ .

### Радиус на вершинах зерен

Из-за сложности определения эквивалентного радиуса  $r_3$ , целесообразно при исследованиях использовать радиус  $r_l$ . В работах [11–13] авторами установлено, что кривизна вершин выступов (радиус  $r_l$ ) зависит от уровня сближения  $\gamma$  (см. рис. 2) режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью.

Таким образом, радиус  $r_l$  зависит от математического ожидания глубины внедрения выступов абразивных зерен  $y_E$ , которая, в свою очередь, зависит от нормальной составляющей силы резания, рассмотренной в работах [15, 16], и, соответственно, от режимных параметров обработки: деформации щетки  $\Delta Y$ , скорости резания  $V$  и подачи  $S$ .

Известно, что при малой глубине внедрения режущего микрорельефа в процессе обработки поверхностей эластичными полимерно-абразивными инструментами микрогеометрия в результате износа инструмента и самозатачивания постоянно меняется и учесть это практически невозможно.

В связи с вышеизложенным принято решение определять реальный радиус  $r_l$  экспериментально, в

зависимости от уровня сближения  $\gamma$ , а следовательно, от режимных параметров обработки –  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$ .

Суммарные составляющие силы резания на всей площадке контакта (согласно работе [11])

$$P_y = K r_3^2 f_y n_p; P_z = K r_3^2 f_z n_p. \quad (10)$$

Средневероятное количество активных (работающих) зерен на единице поверхности контакта эластичного круга с деталью, по работе [13], определяется по выражению

$$n_p = N x b N_D. \quad (11)$$

Подставляя формулы (8), (3), (9) и (11) в уравнение (10) и решая относительно  $\gamma$ , получаем

$$\left( \gamma^{0,802} - \gamma + 0,97 \right)^{0,895} \gamma e^{-\left( \frac{\gamma^2}{2} \right)} = \frac{P_n}{12,749 K r_3^{1,105} \sigma^{0,895} n^2(0) Z_{\text{тр}} b N_D}, \quad (12)$$

где  $P_n$  – полная нормальная составляющая силы резания, по работе [13] (при этом  $P_y = P_n$ );  $Z_{\text{тр}}$  – заданный по чертежу размер обработанной кромки.

Определение величины  $\gamma$  по формуле (12) возможно только при решении численным методом. На рис. 4 приведена зависимость  $\gamma$  от  $A$  – правой части уравнения (12).

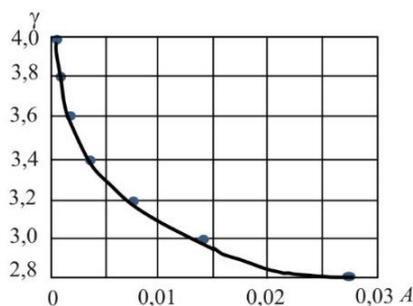


Рис. 4. Графическое представление уравнения (12)

Эта зависимость была аппроксимирована уравнением  $\gamma = 2,5 A^{-0,0531} e^{-2,929 A}$ .

При заданных  $\gamma = 2,9$  и  $K = 300$  Н/мм<sup>2</sup> (для сплава В95пчТ2) и  $K = 450$  Н/мм<sup>2</sup> (для сплава ВТ20) экспериментально определены значения  $r_l$  в зависимости от режимов обработки ( $\Delta Y$  и  $V$ ) и представлены уравнением

$$r_l = g_1 \Delta Y^2 + g_2 V^2 + g_3 \Delta Y + g_4 V + g_5 \Delta Y V + g_6. \quad (13)$$

Значения коэффициентов  $g_1 - g_5$  и свободного члена  $g_6$  для формулы (13) приведены в табл. 1. Скорости резания  $V$  – в м/с, деформации круга  $\Delta Y$  – в мм.

Таблица 1

Значения коэффициентов и свободного члена  
в формуле (13)

Коэффициент	С ВВ-ZB P120	С ВВ-ZB P220	С ВВ-ZB P400	А ВВ-ZB P36	А ВВ-ZB P50
В95пчТ2					
$g_1$	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$g_2$	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0	$6 \cdot 10^{-7}$
$g_3$	$9 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
$g_4$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
$g_5$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
$g_6$	$-1,8 \cdot 10^{-3}$	$-1,95 \cdot 10^{-3}$	$-2,02 \cdot 10^{-3}$	-0,023	$-7,2 \cdot 10^{-3}$
ВТ20					
$g_1$	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$-2,5 \cdot 10^{-5}$
$g_2$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$
$g_3$	$1 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
$g_4$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
$g_5$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
$g_6$	$-2,22 \cdot 10^{-3}$	$-1,85 \cdot 10^{-3}$	$-2,04 \cdot 10^{-3}$	-0,0145	$-7 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

Значения коэффициентов и свободного члена  
для щеток в формуле (14)

Коэффициент	С ВВ-ZB P120	А ВВ-ZB P50	С ВВ-ZB P120	А ВВ-ZB P50
	Материал В95пчТ2		Материал ВТ20	
$d_1$	$-1,051 \cdot 10^{-6}$	$-3,873 \cdot 10^{-6}$	$1,501 \cdot 10^{-5}$	$-2,5217 \cdot 10^{-6}$
$d_2$	$-4,463 \cdot 10^{-3}$	$-3,204 \cdot 10^{-3}$	-0,034 94	$6,7906 \cdot 10^{-4}$
$d_3$	10,71	12,65	26,07	4,36
$d_4$	-0,0192	-0,058	-0,0545	-0,04423
$d_5$	0,389	0,581	0,6483	0,5182
$d_6$	-0,249	-0,397	-0,7212	-0,3651
$d_7$	$-2,21196 \cdot 10^{-7}$	$-2,932 \cdot 10^{-9}$	$-2,6566 \cdot 10^{-8}$	$7,2106 \cdot 10^{-8}$
$d_8$	$1,521 52 \cdot 10^{-4}$	$2,761 44 \cdot 10^{-5}$	$2,763 \cdot 10^{-5}$	$-6,072 \cdot 10^{-6}$
$d_9$	-0,02245	$-3,9037 \cdot 10^{-3}$	$-1,5176 \cdot 10^{-3}$	$8,52 \cdot 10^{-4}$
$d_{10}$	1,833 11	1,04724	0,9533	0,9312

Обработка кромок полимерно-абразивными щетками – это удаление тонкого поверхностного слоя с острой кромки. Известно [17], что прочность приповерхностного слоя обрабатываемой поверхности существенно отличается от прочности остального материала обрабатываемой детали. Она зависит от конкретных условий деформации, типа среды, предыстории обрабатываемого материала и т.д. Ввиду этого принимаем  $K = K_n K_{сд}$ , где  $K_n$  – коэффициент, учитывающий глубину внедрения абразивных зерен в обрабатываемый материал;  $K_{сд}$  – предел текучести на сдвиг, полученный по формуле  $K_{сд} = \sigma_{0,2} / \sqrt{3}$  через предел текучести  $\sigma_{0,2}$ .

В результате проведенных экспериментов получены значения коэффициента  $K_n$  для материалов В95пчТ2 и ВТ20 и представлены в виде уравнения

$$K_n = (d_1 V^2 + d_2 V + d_3)(d_4 \Delta Y^2 + d_5 \Delta Y + d_6) \times (d_7 S^3 + d_8 S^2 + d_9 S + d_{10}). \quad (14)$$

В уравнении (14) значения коэффициентов  $d_{1-10}$  определены по итогам комплекса экспериментов и приведены в табл. 2. В уравнении (14)  $\Delta Y$  – в мм,  $V$  – в м/мин,  $S$  – в мм/мин.

#### Экспериментальное исследование формирования кромки радиальными щетками

Одним из параметров, наиболее приемлемым для производственных условий, является размер кромки  $Z_k$ .

Таблица 3

Съем материала по параметру  $Z_k$

Марка щетки	$\Delta Y$ , мм	$V$ , м/мин	$S$ , мм/мин	$Z_k$ экс., мм	$Z_k$ теор., мм	$P_n$ теор., Н [15]	$S$ , мм/мин	$Z_k$ экс., мм	$Z_k$ теор., мм	$P_n$ теор., Н [15]	
			В95пчТ2 $K = 300$ Н/мм <sup>2</sup>				ВТ20 $K = 450$ Н/мм <sup>2</sup>				
С ВВ-ZB P120 $\sigma = 0,00772$ мм; $m = 136$ мм <sup>-1</sup> ; $n(0) = 42,5$ мм <sup>-1</sup>	4	235,62	130	0,295	0,296	6,896	82	0,077	0,077	7,086	
		471,24		0,433	0,462	10,841		0,167	0,177	11,144	
		706,86		0,658	0,658	16,201		0,316	0,316	16,656	
		942,48		0,971	0,971	21,653		0,524	0,525	22,262	
	2	706,86	130	0,594	0,595	10,183	82	0,275	0,274	10,473	
				0,621	0,629	13,332		0,292	0,298	13,71	
				0,658	0,658	16,201		0,316	0,316	16,656	
				0,705	0,704	18,80		0,347	0,348	19,325	
	4	706,86	82	0,744	0,745	16,201	33	0,346	0,347	16,656	
			130	0,658	0,658		41	0,343	0,342		
			255	0,239	0,239		82	0,316	0,316		
			395	0,164	0,164		130	0,259	0,258		
	А ВВ-ZB P50 $\sigma = 0,00574$ мм; $m = 133$ мм <sup>-1</sup> ; $n(0) = 46,3$ мм <sup>-1</sup>	4	235,62	130	0,235	0,235	18,406	82	0,465	0,466	18,969
			471,24		0,32	0,373	34,702		0,6	0,67	35,829
			706,86		0,461	0,462	51,034		0,824	0,825	52,725
			942,48		0,657	0,658	67,404		1,136	1,135	69,659
2		706,86	130	0,421	0,421	29,553	82	0,762	0,763	30,55	
				0,438	0,436	40,89		0,788	0,748	42,256	
				0,461	0,462	51,034		0,824	0,825	52,725	
				0,49	0,49	60,307		0,87	0,871	62,289	
4		706,86	82	0,515	0,515	51,034	33	0,869	0,868	52,725	
			130	0,461	0,462		41	0,865	0,868		
			255	0,199	0,2		82	0,824	0,825		
			395	0,05	0,049		130	0,738	0,738		

Экспериментальные исследования производительности процесса скругления кромок в зависимости от режимных параметров обработки (деформации щетки  $\Delta Y$ , скорости ее вращения  $V$  и подачи  $S$ ) проводились на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 и титанового сплава ВТ20 на вертикальном обрабатывающем центре Deckel Maho DMC 635V щетками С ВВ-ZB P120 и А ВВ-ZB P50 (наиболее эффективными из всех исследованных). Размеры  $X$  и  $Y$  измерялись на большом инструментальном микроскопе БМИ-1Ц с точностью 1 мкм.

Результаты исследования приведены в табл. 3 по экспериментальным и теоретически рассчитанным данным [15].

**Заключение**

На основании проведенных исследований можно констатировать, что теоретические положения по съему материала полностью подтверждаются экспериментальными данными.

Установлено, что полимерно-абразивные щетки могут эффективно применять для обработки кромок деталей. Из всех исследованных щеток рекомендуются С ВВ-ZB P120 и А ВВ-ZB P50, как наиболее производительные.

**Список литературы**

1. Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 281–288.

2. Fomin A.A. Microgeometry of surfaces after profile milling with the use of automatic cutting control system // Proc. of 2017 Int. Conf. on Indust. Eng., Appl. and Manuf. (ICIEAM-2017), St. Petersburg, 16–19 May 2017. – St. Petersburg, 2017. – Art. no. 8076117.

3. Bratan S., Vladetskaya E., Kharchenko A. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop // MATEC: Web of Conf., Sevastopol, 11–15 September 2017. – Sevastopol, 2017. – Vol 129. – Art. no. 01083.

4. Zverovshchikov A., Zverovshchikov V., Nesterov S. Comprehensive ensuring of quality of surfaces of details at centrifugalplanetary volume processing // MATEC: Web of Conf., Sevastopol, 10–14 September 2018. – Sevastopol, 2018. – Vol. 224. – Art. no. 01123.

5. Effect of the velocity of rotation in the process of vibration grinding / K. Hamouda, H. Bournine, M.A. Tamarkin, A.P. Babichev, D. Saidi, H.E. Amrou // Surf. State Materials Sci. – 2016. – Vol. 52 (2). – P. 216–221.

6. Shi J., Wang J.Y., Liu C.R. Modelling white layer thickness based on the cutting parameters of hard Machining // Proc. of the Inst. of Mech. Eng. Part B: J. of Eng. Manuf. – 2006. – Vol. 220, iss. 2. – P. 119–128.

7. Research on processing efficiency and contact characteristics of M300 steel surface grinding with elastic abrasives jixie gongcheng xuebao / X. Wu, Z. Chen, T. Zhou, C. Ma, X. Shu, J. Dong // J. of Mech. Eng. – 2018. – Vol. 54, iss. 1. – P. 171–177.

8. Wu X., Zhou T., Tong Z. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of m330 steel // J. of Comp. and Theoret. Nanosci. – 2017. – Vol 14, iss. 11. – P. 5372–5377.

9. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование характеристик полимерно-абразивных щеток // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 4. – С. 19–25.

10. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование производительности процесса скругления кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник ИрГТУ. – 2017. – № 3. – С. 74–78.

11. Димов Ю.В. Обработка деталей свободным абразивом. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – 293 с.

12. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. – Рига: Зинатне, 1975. – 210 с.

13. Лукьянов В.С., Рудзит Я.А. Параметры шероховатости поверхности. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 162 с.

14. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Математическая модель для определения производительности обработки деталей полимерно-абразивными кругами // Вестник машиностроения. – 2018. – № 8. – С. 56–63.

15. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Расчет силы, действующей на кромку детали при обработке абразивными щетками // Вестник машиностроения. – 2016. – № 11. – С. 59–63.

16. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Силы резания при обработке эластичными абразивными кругами // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 7 (102). – С. 47–55.

17. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

## References

1. Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 281–288.

2. Fomin A.A. Microgeometry of surfaces after profile milling with the use of automatic cutting control system. *Proc. of 2017 Int. Conf. on Indust. Eng., Appl. and Manuf. (ICIEAM-2017)*, 2017, Art. no. 8076117.

3. Bratan S., Vladetskaya E., Kharchenko A. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop. *MATEC: Web of Conf., Sevastopol*. Sevastopol, 2017, vol. 129. Art. no. 01083.

4. Zverovshchikov A., Zverovshchikov V., Nesterov S. Comprehensive ensuring of quality of surfaces of details at centrifugal-planetary volume processing. *MATEC: Web of Conf. Sevastopol*, 2018, vol. 224. Art. no. 01123.

5. Hamouda K., Bournine H., Tamarkin M.A., Babichev A.P., Saidi D., Amrou H.E. Effect of the velocity of rotation in the process of vibration grinding. *Surf. State Materials Science*, 2016, vol. 52 (2), pp. 216–221.

6. Shi J., Wang J.Y., Liu C.R. Modelling white layer thickness based on the cutting parameters of hard Machining. *Proc. of the Inst. of Mech. Eng. Part B: J. of Eng. Manuf.*, 2006, vol. 220, iss. 2, pp. 119–128.

7. Wu X., Chen Z., Zhou T., Ma C., Shu X., Dong J. Research on processing efficiency and contact characteristics of M300 steel surface grinding with elastic abrasives jixie gongcheng xuebao. *Journal of Mech. Eng.*, 2018, vol. 54, iss. 1, pp. 171–177.

8. Wu X., Zhou T., Tong Z. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of m330 steel. *Journal of Comp. and Theoret. Nanosci.*, 2017, vol. 14, iss. 11, pp. 5372–5377.

9. Dimov Iu.V., Podashev D.B. Issledovanie kharakteristik polimerno-abrazivnykh shchetok [Investigation of polymer-abrasive brushes characteristics]. *Vestnik IrGTU*, 2016, no. 4, pp. 19–25.

10. Dimov Iu.V., Podashev D.B. Issledovanie proizvoditel'nosti protsessa skrugleniia kromok polimerno-abrazivnymi shchetkami [Performance study of edge rounding process with polymer-abrasive brushes]. *Vestnik IrGTU*, 2017, no. 3, pp. 74–78.

11. Dimov Iu.V. Obrabotka detalei svobodnym abrazivom [Processing of parts with free abrasive]. Irkutsk: Izdatel'stvo IrGTU, 2000, 293 p.

12. Rudzit Ia.A. Mikrogeometriia i kontaktное взаимодействие poverkhnostei [Microgeometry and contact surface interaction]. Riga: Zinatne, 1975, 210 p.

13. Luk'ianov V.S., Rudzit Ia.A. Parametry sheroxhovatosti poverkhnosti [Surface roughness parameters]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1979, 162 p.

14. Dimov Iu.V., Podashev D.B. Matematicheskaia model' dlia opredeleniia proizvoditel'nosti obrabotki detalei polimerno-abrazivnymi krugami [Mathematical model for determining the productivity of machining parts with polymer-abrasive wheels]. *Vestnik mashinostroeniia*, 2018, no. 8, pp. 56–63.

15. Dimov Iu.V., Podashev D.B. Raschet sily, deistvuiushchei na kromku detali pri obrabotke abrazivnymi shchetkami [Calculation of force acting on the workpiece edge when blasting with abrasive brushes]. *Vestnik mashinostroeniia*, 2016, no. 11, pp. 59–63.

16. Dimov Iu.V., Podashev D.B. Sily rezaniia pri obrabotke elastichnymi abrazivnymi krugami [Cutting forces when machining with elastic abrasive wheels]. *Vestnik IrGTU*, 2015, no. 7 (102), pp. 47–55.

17. Akhmatov A.S. Molekuliarnaia fizika granichno-gotreniia [Molecular physics of boundary friction]. Moscow: Fizmatgiz, 1963, 472 p.

Получено 27.05.2020

Опубликовано 12.10.1010

#### Сведения об авторах

**Димов Юрий Владимирович** (Иркутск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении Иркутского

национального исследовательского технического университета, e-mail: Dimov-Ura@yandex.ru.

**Подашев Дмитрий Борисович** (Иркутск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении Иркутского национального исследовательского технического университета, e-mail: dbp90@mail.ru.

#### About the authors

**Yuriy V. Dimov** (Irkutsk, Russian Federation) – Doctor in Technical Sciences, Professor, Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: Dimov-Ura@yandex.ru.

**Dmitriy B. Podashev** (Irkutsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: dbp90@mail.ru.