

Подашев Д.Б. Качество кромок при финишной обработке деталей на робототехническом комплексе // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 61–69. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.07

Podashev D.B. The quality of edges when finishing parts on robotic complex. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 61–69. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.07

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 1, 2020**

**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.07  
УДК 621. 923: 621.922

**Д.Б. Подашев**

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**КАЧЕСТВО КРОМОК ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ  
НА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

Необходимость замены ручного труда на механизированный и автоматизированный является актуальной проблемой для отечественного машиностроения. Рассмотрена возможность применения промышленного робота для выполнения финишной обработки кромок деталей. Исследованы зависимости показателей качества обработанной кромки по геометрической точности (отклонение месторасположения) от режимных параметров при обработке торцевыми цельнолитыми полимерно-абразивными щетками компании 3М (США). Получены эмпирические зависимости размера кромки и шероховатости обработанной поверхности от деформации щетки, скорости резания и подачи. Использование полимерно-абразивных щеток для обработки кромок обеспечивает все требования по качеству обработанных кромок. Доказано, что обработка кромок на промышленном роботе может успешно выполняться полимерно-абразивными торцевыми щетками, при этом заниженная (по сравнению с другим металлорежущим оборудованием) жесткость и повышенная чувствительность робототехнического комплекса к колебательным явлениям не оказывает существенного влияния на производительность процесса обработки и качество обработанных кромок. Установлено, что робототехнический комплекс (при соответствующей балансировке инструмента) может успешно применяться в производственных условиях. Полученные регрессионные уравнения размера и качества обработанной кромки для торцевых щеток позволяют эффективно управлять производительностью процесса и качеством обработанной кромки с помощью режимных параметров обработки. Кроме полимерно-абразивных инструментов, рассмотренных в настоящей статье, на робототехническом комплексе возможно применение и других инструментов, например инструментов из шлифовальных шкур и абразивосодержащих полотен, кругов с абразивным покрытием, обтянутых шлифшкуркой; кругов, покрытых слоем абразива, лепестковых кругов различной конструкции, абразивосодержащих кругов.

**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, промышленный робот, электрошпиндель, торцевая полимерно-абразивная щетка, обработка кромок, скругление, производительность процесса, отклонение месторасположения, шероховатость, регрессионные уравнения.

**D.B. Podashev**

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**THE QUALITY OF EDGES WHEN FINISHING PARTS ON ROBOTIC COMPLEX**

The necessity to replace manual labor with mechanized and automated is an urgent problem for native mechanical engineering. The article discusses the possibility of using the industrial robot to perform finish processing of the detail edges. The dependences of the quality indicators of the machined edge in geometric accuracy (deviation of the location) and surface roughness from operating parameters during processing with solid-end polymer-abrasive brushes of the company 3M (USA) are investigated. Empirical dependences of the edge size and roughness of the treated surface on the deformation of the brush, the cutting speed and feed are obtained. The use of polymer-abrasive brushes for edge processing provides all the requirements for the quality of the processed edges. It is proved that the processing of edges on an industrial robot can be successfully performed by polymer-abrasive end brushes, while the lowered (compared with other metal-cutting equipment) stiffness and increased sensitivity of the robotic complex to oscillatory phenomena does not significantly affect the productivity of the processing process and the quality of the processed edges. It has been established that the robotic complex (with appropriate instrument balancing) can be successfully used in production conditions. The obtained regression equations for the size and quality of the machined edge for end brushes allow you to effectively control the process productivity and roughness of the machined edge using the processing parameters. In addition to the polymer-abrasive tools discussed in this article, other tools can also be used on the robotic complex, for example: tools from grinding skins and abrasive-containing cloths; circles with abrasive coating: covered with sandpaper; circles coated with a layer of abrasive; petal circles of various designs; abrasive wheels.

**Keywords:** robotic complex, industrial robot, electrospindle, end-face polymer-abrasive brush, edge processing, rounding, process productivity, location deviation, roughness, regression equations.

В настоящее время на машиностроительных предприятиях многие финишные операции (зачистка поверхностей, снятие заусенцев, скругление острых кромок и т.п.) выполняются вручную, на что тратятся значительные трудовые ресурсы. Исходя из этого проблема механизации и автоматизации таких финишных операций является весьма актуальной.

Рассмотрим возможность обработки кромок деталей с использованием робототехнического комплекса (РТК).

Исследования проводились на РТК, показанном на рис. 1 и состоящем из следующих элементов:

- работа KUKA KR 210 R2700 EXTRA (Германия) с системой управления KR C4 радиусом действия 2696 мм, шестью осями, системой программного обеспечения Windows XP;

- электрошпинделя производства Elettromeccanica Giordano Colombo (Италия) модели RC90 с частотой вращения шпинделя 240–24 000 мин<sup>-1</sup>, номинальной мощностью 4 кВт, со сменой инструмента (несколько магазинов с тремя инструментами в магазине), с цапгами Ø 2–16 мм, максимальным диаметром инструмента 380 мм;

- стола производства Forster (Германия) размером 4000×1500 мм.



Рис. 1. РТК с использованием промышленного робота KUKA KR 210 R2700 EXTRA

С учетом малой жесткости и виброустойчивости робота с закрепленным электрошпинделем предусматривалась балансировка инструмента на модульной балансировочной системе Naimer TD2009 Comfort Plus (Германия) с рабочими оборотами шпинделя 300–1100 об/мин, максимальной длиной инструмента 400 мм, точностью измерения <0,5 мм. Балансировка проводилась по ГОСТ ИСО 1940-1–2007 «Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1.

Определение допустимого дисбаланса» по классу точности балансировки G6,3.

Для обработки кромок весьма эффективным инструментом, как показали исследования [1–26], являются полимерно-абразивные щетки.

При исследованиях использовались цельнолитые торцевые щетки марки BD-ZB компании 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company), США (рис. 2).

Щетка изготовлена из полимера, по всему объему которого равномерно распределены зерна пирамидальной формы высокопроизводительного и износостойкого абразивного материала 3M<sup>TM</sup> Cubitron<sup>TM</sup>.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 и титанового сплава ВТ20 на обучающем режиме программирования процесса обработки.

Размеры обработанной кромки  $X$ ,  $Y$  и  $p$  (рис. 3) измерялись на большом инструментальном микроскопе БМИ-1ц с ценой деления 1 мкм.

Исследование обработки кромок на РТК производилось по схеме, приведенной на рис. 3, при размере  $A = 45$  мм и  $\alpha = 45^\circ$  торцевыми щетками BD-ZB Bristle P50, BD-ZB Bristle P80 и BD-ZB Bristle P120.

Производительность процесса обработки кромок оценивалась средней величиной размера кромки по осям  $X$  и  $Y$ , которая определялась по выражению

$$Z_k = \frac{X+Y}{2}, \quad (1)$$

где  $X$ ,  $Y$  – размеры кромки по осям (см. рис. 3).

В результате проведенных экспериментов установлены экстремальные зависимости размера кромки от частоты вращения (рис. 4) при обработке как В95пчТ2, так и ВТ20.

Экстремальный характер зависимости размера кромки от частоты вращения объясняется запаздыванием распрямления ворсин после прохождения кромки, в результате чего следующее касание происходит при меньшей деформации ворсины, а следовательно, при меньшей силе взаимодействия с кромкой.

На основании этих данных следует считать, что частоту вращения свыше 4000 об/мин применять не рекомендуется.

Зависимость размера кромки от деформации щетки приведена на рис. 5. По данным работы [10], с увеличением деформации размер кромки растет в связи с увеличением силы резания.

С увеличением подачи размер кромки уменьшается (рис. 6).

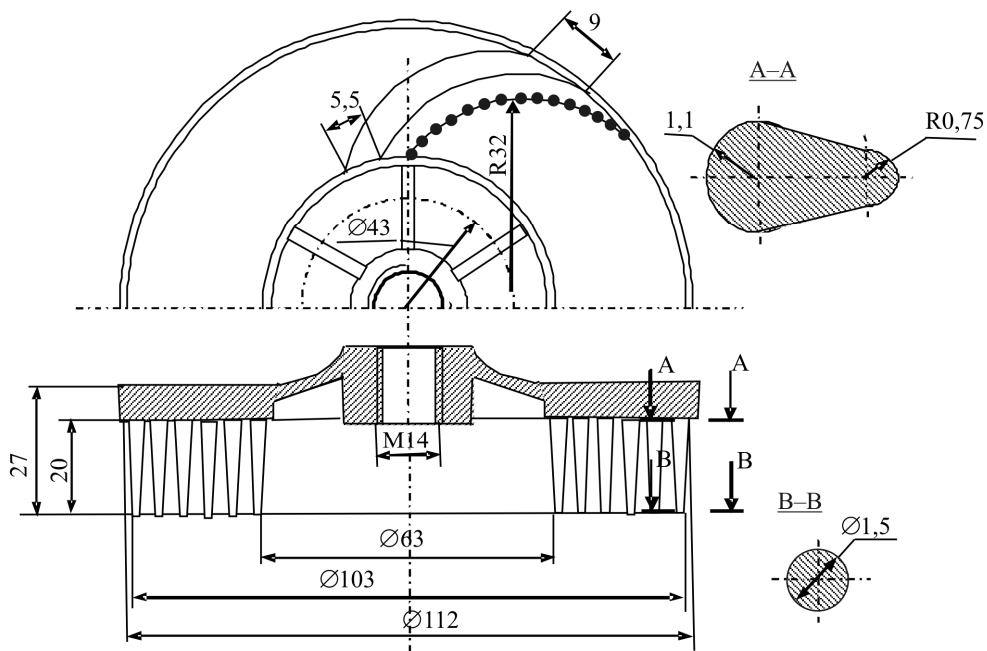


Рис. 2. Торцевая щетка BD-ZB, состоящая из 36 рядов, в ряду 15 ворсин, всего 540 ворсин

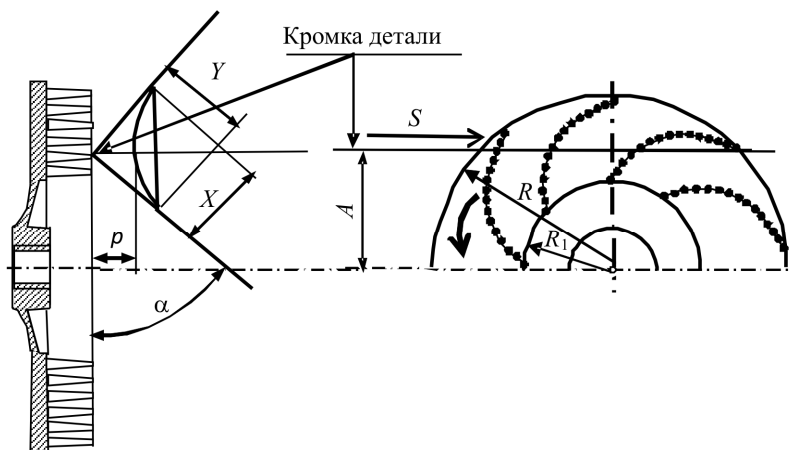


Рис. 3. Схема обработки кромки детали торцевой щеткой

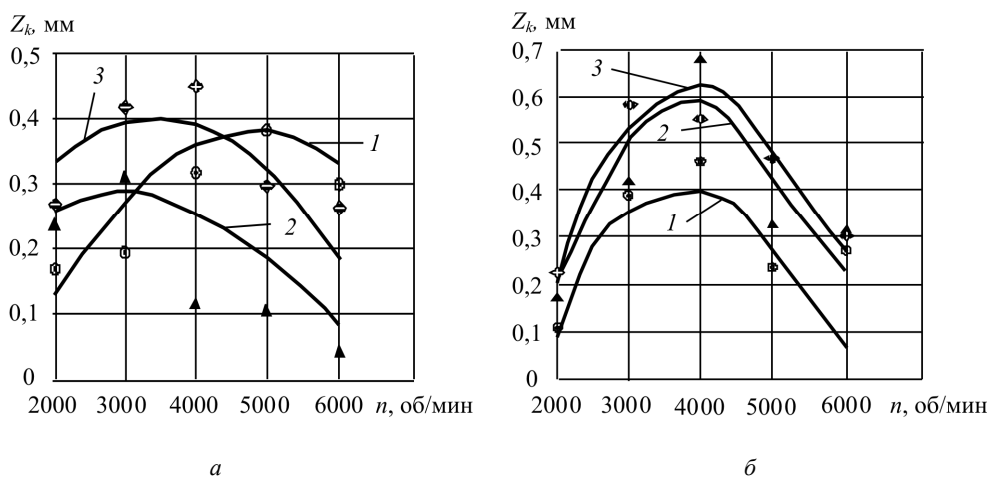


Рис. 4. Зависимости  $Z_k$  от частоты вращения торцевой щетки при  $\Delta Y = 1,5$  мм;  $A = 45$  мм:  
 а – для В95пчТ2 при  $S = 400$  мм/мин; б – для BT20 при  $S = 200$  мм/мин;  
 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120

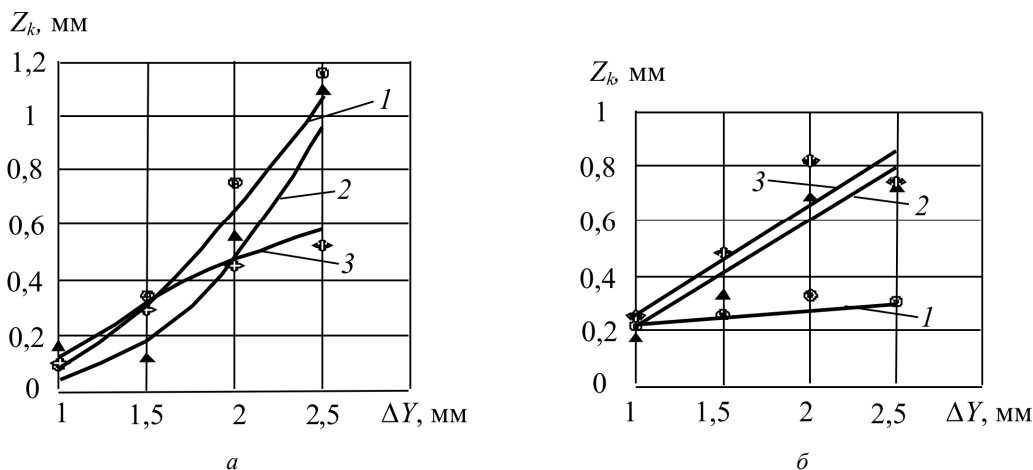


Рис. 5. Зависимости  $Z_k$  от деформации торцевой щетки при  $n = 5000$  об/мин;  $A = 45$  мм:  $a$  – для В95пчТ2 при  $S = 400$  мм/мин;  $b$  – для BT20 при  $S = 200$  мм/мин; 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120

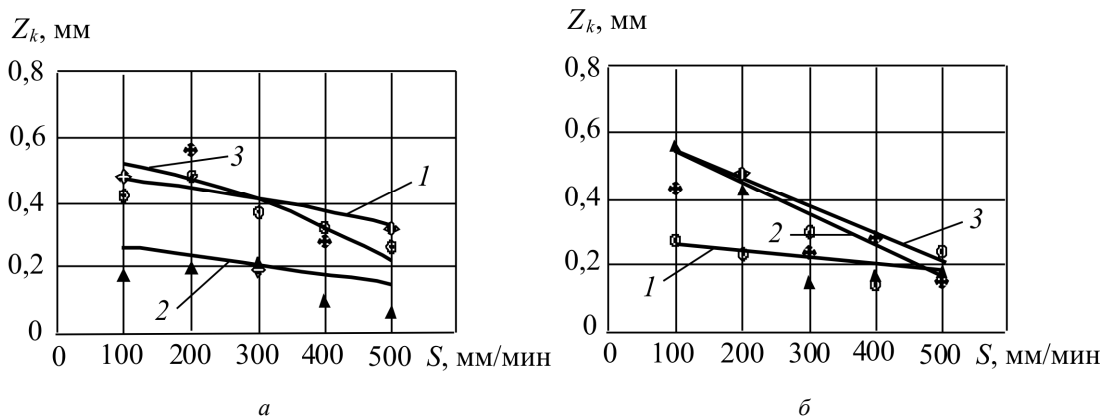


Рис. 6. Зависимости  $Z_k$  от подачи торцевой щетки при  $n = 5000$  об/мин;  $\Delta Y = 1,5$  мм;  $A = 45$  мм:  $a$  – для В95пчТ2;  $b$  – для BT20; 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120

По полученным экспериментальным данным при соответствующей статистической обработке получено уравнение для определения размера кромки  $Z_k$  (мм) в зависимости от частоты вращения  $n$  (об/мин) деформации щетки  $\Delta Y$  (мм) и подачи  $S$  (мм/мин):

$$Z_k = a_1 \Delta Y^2 + a_2 n^2 + a_3 S^2 + a_4 \Delta Y + a_5 n + a_6 S + a_7 \Delta Y n + a_8 \Delta Y S + a_9 n S + a_{10} \Delta Y n S + a_{11}. \quad (2)$$

Значения коэффициентов  $a_{1-10}$ , и свободного члена  $a_{11}$  в данном уравнении приведены в табл. 1.

При необходимости достижения требуемого размера кромки  $Z_k$  регулирование процесса обработки можно осуществлять за счет любого из параметров, например подачи  $S$ .

При заданных  $Z_k$ ,  $\Delta Y$  и  $n$  подача  $S$  определяется по формуле

$$S = \frac{-d + \sqrt{d^2 - 4a_2 f}}{2a_3},$$

где  $d = a_6 + a_8 \Delta Y + a_9 n + a_{10} \Delta Y n$ ;  $f = a_1 (\Delta Y)^2 + a_2 n^2 + a_4 \Delta Y + a_5 n + a_7 \Delta Y n + a_{11} - Z_k$ .

Отклонение месторасположения (позиционирование) представляет собой относительное отклонение от симметричности расположения радиуса закругления:

$$\delta = \frac{X - Y}{Z_k},$$

где  $X$ ,  $Y$  – координаты перехода конца закругления в прямую линию (см. рис. 3);  $Z_k$  – средняя величина по осям  $X$  и  $Y$  по уравнению (1).

Эксперименты проводились при расположении образца под углом  $\alpha = 45^\circ$ .

Поскольку величина  $\delta$  является относительной, в табл. 2 приведены средние значения по всем щеткам. Как видно из результатов исследования, отклонение месторасположения кромки зависит от режимных параметров ( $\Delta Y$ ,  $n$  и  $S$ ) и механических свойств обрабатываемого материала. Однако при всех параметрах обработки  $\delta$  не выходит за пределы допустимых.

Таблица 1

Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (2)

Коэффициент и свободный член	B95пчТ2			BT20		
	Инструмент – торцевая щетка					
	BD-ZB Bristle P50	BD-ZB Bristle P80	BD-ZB Bristle P120	BD-ZB Bristle P50	BD-ZB Bristle P80	BD-ZB Bristle P120
$a_1$	0,06	0,31	-0,05	-0,01	-0,04	-0,06
$a_2$	$-3,2 \cdot 10^{-8}$	$-2,1 \cdot 10^{-8}$	$-3 \cdot 10^{-8}$	$-1,005 \cdot 10^{-7}$	$-1,18 \cdot 10^{-7}$	$-1,3 \cdot 10^{-7}$
$a_3$	$-6 \cdot 10^{-7}$	$-7 \cdot 10^{-8}$	$-4 \cdot 10^{-7}$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$-8 \cdot 10^{-7}$
$a_4$	0,486	-0,455	0,475	0,089	0,528	0,618
$a_5$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$a_6$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-4}$	$-6 \cdot 10^{-4}$	$-8 \cdot 10^{-5}$	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-4}$
$a_7$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$a_8$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$	$-3,5 \cdot 10^{-9}$
$a_9$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$
$a_{10}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$
$a_{11}$	-1,18	0,15	-0,23	-1,135	-1,52	-1,96

Таблица 2

Отклонение месторасположения кромки  $\delta$  при различных режимах обработки при  $A = 0$ 

$n$ , об/мин	B95пчТ2 при $\Delta Y = 2$ мм, $S = 130$ мм/мин	BT20 при $\Delta Y = 2$ мм, $S = 42$ мм/мин	$\Delta Y$ , мм	B95пчТ2 при $n = 1600$ об/мин, $S = 130$ мм/мин	BT20 при $n = 1600$ об/мин, $S = 42$ мм/мин	$S$ , мм/мин	B95пчТ2 при $n = 1600$ об/мин, $\Delta Y = 2$ мм	BT20 при $n = 1600$ об/мин, $\Delta Y = 2$ мм
500	-0,018	-0,054	1	-0,123	-0,328	13	-	-0,352
1000	-0,108	-0,109	2	-0,193	-0,166	42	-	-0,367
1600	-0,177	-0,189	3	-0,100	-0,094	82	-0,347	-0,124
2000	-0,28	-0,253	4	-0,195	-0,188	130	-0,231	-0,057
-	-	-	-	-	-	255	-0,142	-
-	-	-	-	-	-	395	-0,0765	-

По ГОСТ 30893.1–2002 (ИСО 2768-1–89) предусмотрены предельные отклонения притупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок):

– для точного ( $f$ ) и среднего ( $m$ ) классов точности  $\pm 0,2$  мм;

– для грубого ( $c$ ) и очень грубого ( $v$ ) классов точности  $\pm 0,4$  мм.

В переводе на относительную величину для классов точности  $f$  и  $m$  допустимый показатель

$$\delta = \frac{T_r}{\bar{X}_{\min}} = \frac{0,4}{0,3} = 1,33,$$

где  $T_r$  – допуск радиуса скругления;  $\bar{X}_{\min}$  – наименьший предельный размер радиуса.

Для классов точности  $c$  и  $v$   $\delta = 0,8/0,3 = 2,66$ .

Следовательно, для всех исследованных случаев показатель  $\delta$  находится в пределах допуска.

*Шероховатость* поверхности кромки измерялась на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1.

Исследования шероховатости  $R_a$  при обработке торцевыми щетками BD-ZB Bristle P50, BD-ZB Bristle P80 и BD-ZB Bristle P120 показали, что с уве-

личением частоты вращения щетки параметр  $R_a$  изменяется по экстремальной зависимости (рис. 7).

Это связано с запаздыванием распрямления ворсин после прохождения кромки, в результате чего следующее касание происходит при меньшей деформации ворсины, а следовательно, при меньшей силе взаимодействия с кромкой.

Деформация щетки напрямую ведет к пропорциональному изменению шероховатости, что связано с увеличением силы резания [10] и подтверждается зависимостями на рис. 8. С увеличением подачи шероховатость уменьшается (рис. 9), что объясняется уменьшением количества актов взаимодействия ворсин с обрабатываемой кромкой.

По полученным экспериментальным данным при соответствующей статистической обработке получено уравнение для определения параметра шероховатости  $R_a$  (мкм) в зависимости от частоты вращения щетки  $n$  (об/мин), деформации щетки  $\Delta Y$  (мм) и подачи  $S$  (мм/мин):

$$R_a = a_1 \Delta Y^2 + a_2 n^2 + a_3 S^2 + a_4 \Delta Y + a_5 n + a_6 S + a_7 \Delta Y n + a_8 \Delta Y S + a_9 n S + a_{10} \Delta Y n S + a_{11}. \quad (3)$$

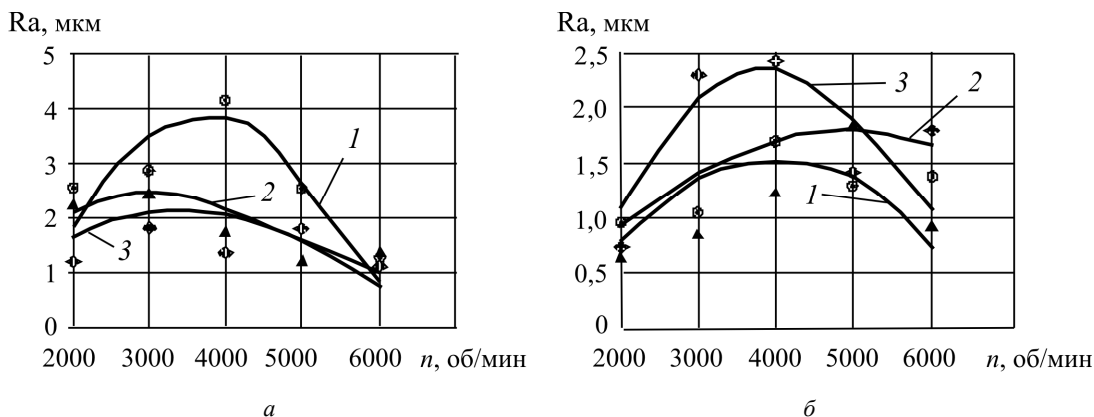


Рис. 7. Зависимости Ra от частоты вращения торцевой щетки при  $\Delta Y = 1,5$  мм;  $A = 45$  мм:  
 а – для В95пчТ2 при  $S = 400$  мм/мин; б – для BT20 при  $S = 200$  мм/мин;  
 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120

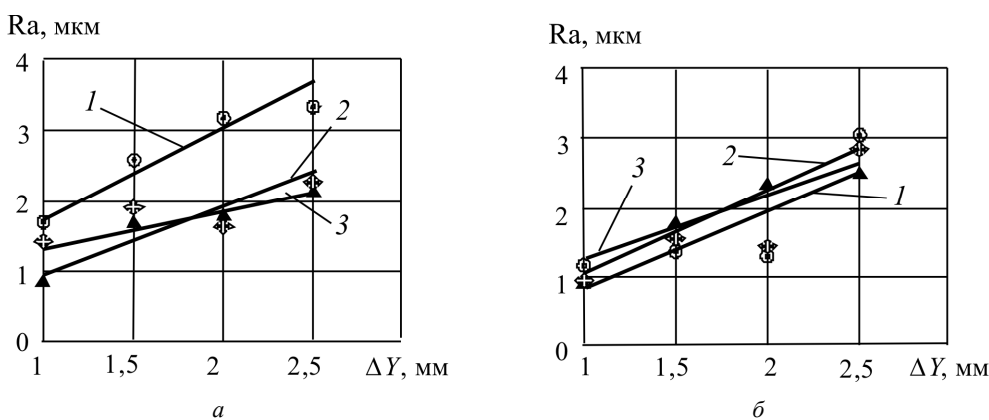


Рис. 8. Зависимости Ra от деформации торцевой щетки при  $n = 5000$  об/мин;  $A = 45$  мм:  
 а – для В95пчТ2 при  $S = 400$  мм/мин; б – для BT20 при  $S = 200$  мм/мин;  
 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120

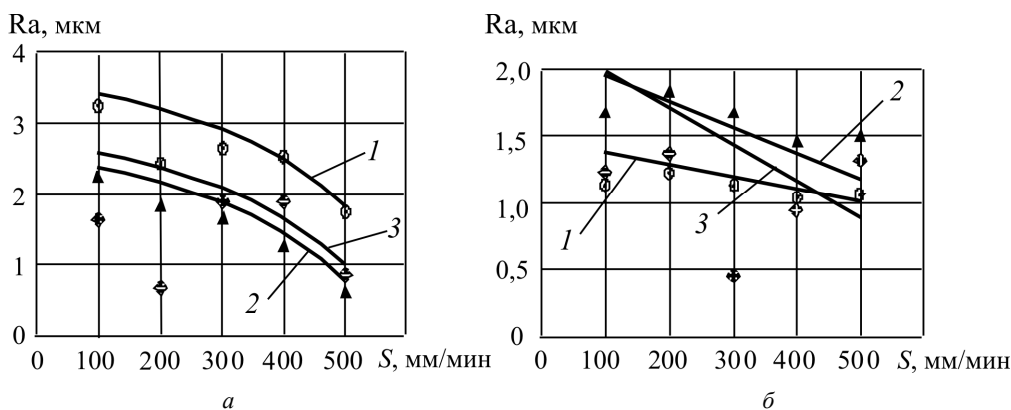


Рис. 9. Зависимости Ra от подачи торцевой щетки при  $n = 5000$  об/мин;  $\Delta Y = 1,5$  мм;  $A = 45$  мм:  
 а – для В95пчТ2; б – для BT20; 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120

Значения коэффициентов  $a_{1-10}$  и свободно-го члена  $a_{11}$  в данном уравнении приведены в табл. 3.

Следует отметить, что торцевыми щеткам на РТК возможна обработка труднодоступных участков деталей. На рис. 10 в качестве примера показана обработка такой кромки.

Кроме щеток, рассмотренных в данной статье, на РТК возможно применение и других эластичных инструментов, рассмотренных в работе [11]:

1. Инструменты из шлифовальных шкурки и абразивосодержащих полотен: конусы, трубки, колпачки, гильзы, диски (на липучке, на перфорации).

Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (3)

Коэффициент и свободный член	B95ПчТ2			BT20		
	Инструмент – торцевая щетка					
	BD-ZB Bristle P50	BD-ZB Bristle P80	BD-ZB Bristle P120	BD-ZB Bristle P50	BD-ZB Bristle P80	BD-ZB Bristle P120
$a_1$	-0,3	-0,2	-0,2	0,1	-0,3	-0,2
$a_2$	$-7 \cdot 10^{-7}$	$-3 \cdot 10^{-7}$	$-1,9 \cdot 10^{-7}$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$-1 \cdot 10^{-7}$	$-4 \cdot 10^{-7}$
$a_3$	$-9 \cdot 10^{-6}$	$-6,5 \cdot 10^{-6}$	$-6,5 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-7 \cdot 10^{-7}$	$-3 \cdot 10^{-6}$
$a_4$	2,19	1,54	1,22	0,75	1,95	1,9
$a_5$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$a_6$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$-1,7 \cdot 10^{-3}$	$-7 \cdot 10^{-4}$
$a_7$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
$a_8$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$	$-2,41 \cdot 10^{-9}$
$a_9$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$
$a_{10}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$
$a_{11}$	-7,27	-1,4	-0,5	-2,95	-2,58	-5,34

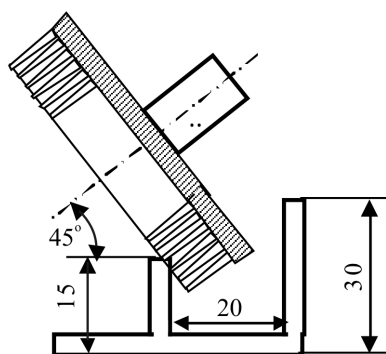


Рис. 10. Схема обработки труднодоступной прямолинейной кромки

2. Круги с абразивным покрытием: обтянутые шлифшкуркой (войлочные, резиновые, паралоновые, воздушные баллоны), покрытые слоем абразива (войлочные, резиновые, паралоновые, полиуретановые).

3. Лепестковые круги: из шлифшкурки, шлифшкурки с прорезями, шлифшкурки V-образной формы, сизаля со шлифшкуркой, нетканого материала, полимерно-абразивных полос.

4. Абразивосодержащие круги: на основе вспененного полиуретана и других синтетических материалов, на поропластовой связке, из нетканых материалов (с синтетическими или природными волокнами, антипригарными и антистатическими добавками).

### Заключение

Роботизация финишной обработки деталей с использованием полимерно-абразивного инструмента является одним из перспективных направлений замены ручного труда на механизированный и автоматизированный.

Доказано, что обработка кромок на промышленном роботе, несмотря на заниженную по сравнению с другим металлорежущим оборудованием жесткость и повышенную чувствительность к ко-

лебательным явлениям, может успешно выполняться торцевыми щетками с высокими скоростями (до 4000 об/мин) при высоком качестве обработанной поверхности. Следовательно, РТК (при соответствующей балансировке инструмента) может успешно применяться в промышленных условиях. Полученные регрессионные уравнения размера и шероховатости обработанной кромки для торцевых щеток позволяют эффективно управлять производительностью процесса и шероховатостью обработанной кромки с помощью режимных параметров обработки.

### Список литературы

1. Абрашкевич Ю.Д., Оглоблинский В.А., Оглоблинский А.В. Щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных материалов // Мир техники и технологий. – 2006. – № 5. – С. 50–52.
2. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.Н. Полимерно-абразивные щеточные инструменты для обработки металлических и неметаллических поверхностей // КНУБА: сб. науч. тр. – 2006. – С. 60–65.
3. Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М. Эффективная эксплуатация полимерно-абразивной щетки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2016. – Вып. 73. – С. 59–62.
4. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Механизм взаимодействия полимерного абразивосодержащего волокна с обрабатываемой поверхностью // Современные информационные и инновационные технологии на транспорте (MINTT-2011): материалы III Международ. науч.-практ. конф.: в 2 т., г. Херсон, 23–25 мая 2011 г. – Херсон: Изд-во Херсон. гос. мор. ин-та, 2011. – Т. 1. – С. 104–108.
5. Абрашкевич Ю.Д., Михайловский В.Н., Оглоблинский В.А. Особенности изготовления и работы полимерно-абразивных щеток // Технология и механизация монтажа оборудования. – 1984. – С. 99–103.
6. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование качества поверхности при скруглении кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 9. – С. 23–34.

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

8. Подашев Д.Б. Финишная обработка деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами: монография. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. – 246 с.

9. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Силы, действующие на кромку детали, при обработке полимерно-абразивными щетками // Вестник машиностроения. – 2016. – № 11. – С. 59–63.

10. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Силы резания при обработке кромок торцовыми щетками // Вестник ИрГТУ. – 2017. – Т. 21, № 12. – С. 22–42.

11. Димов Ю.В. Обработка деталей эластичным инструментом: справ. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 484 с.

12. Обоснование выбора полимерно-абразивного инструмента для выполнения отделочных операций / С.И. Дядя [и др.] // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2010. – № 2. – С. 145–148.

13. Китов А.К. Определение геометрических и силовых параметров контакта ворса полимерно-абразивной щетки с поверхностью детали // Механика деформируемых сред в технологических процессах: сб. науч. тр. – 1997. – С. 23–28.

14. Китов А.К. Измерительный комплекс для определения параметров контакта ворсового инструмента с поверхностью детали // Механика деформируемых сред в технологических процессах: сб. науч. тр. – 1997. – С. 103–107.

15. Китов А.К. К вопросу о механических характеристиках полимерно-абразивных ворсин // Механика деформируемых сред в технологических процессах: сб. науч. тр. – 1997. – С. 79–82.

16. Макаров В.Ф., Виноградов А.В. Измерение профиля скругленных кромок образцов при обработке кромок дисков ГТД абразивно-полимерными щетками // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 2. – С. 106–115.

17. Пини Б.Е., Яковлев Д.Р. О некоторых технологических возможностях щеток с абразивно-полимерным волокном // Известия МГТУ МАМИ. – 2009. – № 1 (7). – С. 148–151.

18. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимераабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки // Вестник Харьков. нац. автомоб.-дорож. ун-та. – 2006. – № 33. – С. 106–108.

19. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава ВТ8-М // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – № 2. – С. 87–90.

20. Устинович Д.Ф. Эластичный абразивный инструмент для отделочно-зачистной обработки // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 3–5 окт. 2007 г. / ГНУ ФТИ НАНБ. – Минск, 2007. – С. 142–146.

21. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И., Мочайло А.Г. Эластичный полимерно-абразивный инструмент с дискретным режущим контуром // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. 15-й Междунар. науч.-

техн. конф., г. Севастополь, 15–20 сент. 2008 г.: в 4 т. / ДонНТУ. – Донецк, 2008. – Т. 3. – С. 241–244.

22. Устинович Д.Ф. Экспериментальное исследование качества плоских поверхностей при обработке дисковыми абразивными щетками // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 130–134.

23. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И. Зависимости мощности от режимов шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 1 (18). – С. 75–79.

24. Чапышев А.П., Иванова, А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 6 (2). – С. 533–537.

25. Чапышев А.П., Старобубцева Д.А. Программный модуль назначения режимов финишной обработки с применением автоматических щеточных стационарных установок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 21–37.

26. Яковлев Д.Р., Пини Б.Е. О взаимодействии волокна абразивно-полимерной щетки с обрабатываемой поверхностью // Известия МГТУ МАМИ. – 2009. – № 2 (8). – С. 184–187.

## References

1. Abrashkevich Yu.D., Ogloblinskii V.A. Ogloblinskii A.V. Shchetochnye instrumenty na osnove polimerno-abrazivnykh materialov [Polymer-abrasive brushing tools]. *Mir tekhniki i tekhnologii*, 2006, no. 5, pp. 50–52.

2. Abrashkevich Yu.D., Pelevin L.E., Machishin G.M. Polimerno-abrazivnye shchetochnye instrumenty dlia obrabotki metallicheskih i nemetallicheskih poverkhnostei [Polymer-abrasive brushing tools for machining metal and non-metal surfaces]. *Sbornik nauch. Trudov KNUBA*, 2006, pp. 60–65.

3. Abrashkevich Yu.D., Machishin G.M. Effektivnaia ekspluatatsiia polimerno-abrazivnoi shchetki [Efficient operation of the polymer-abrasive brush]. *Vestnik khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2016, iss. 73, pp. 59–62.

4. Abrashkevich Yu.D., Pelevin L.E., Machishin G.M. Mekhanizm vzaimodeistviia polimernogo abrazivsoedershashchego volokna s obrabatyvaemoi poverkhnost'iu [Mechanism of interaction of polymer abrasive fiber with the treated surface]. *Sovremennye informatsionnye i innovatsionnye tekhnologii na transporte (MINTT – 2011), Kherson, 23–25 May, 2011: materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kherson: Izdatel'stvo khersonskogo gosudarstvennogo morskogo instituta, 2011, pp. 104–108.

5. Abrashkevich Yu.D., Mikhailovskii V.N., Ogloblinskii V.A. Osobennosti izgotovleniia i raboty polimerno-abrazivnykh shchetok [Features of manufacturing and operation of polymer-abrasive brushes]. *Tekhnologiya i mekhanizatsiia montazha oborudovaniia*. Moscow, 1984, pp. 99–103.

6. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Issledovanie kachestva poverkhnosti pri skruglenii kromok polimerno-abrazivnymi shchetkami [Investigation of surface quality at edge rounding with polymer-abrasive brushes]. *Vestnik IrGTU*, 2016, no. 9, pp. 23–34.



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

8. Podashev D.B. Finishnaia obrabotka detalei elastichnymi polimerno-abrazivnymi instrumentami: monografiia [Finishing of parts with elastic polymer-abrasive tools]. Irkutsk: Izdatelstvo IRNITU, 2018, 246 p.

9. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Sily, deistvuiushchie na kromku detali, pri obrabotke polimerno-abrazivnymi shchetkami [Edge forces when machining with polymer-abrasive brushes]. *Vestnik mashinostroeniia*. 2016, no. 11, pp. 59–63.

10. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Sily rezaniia pri obrabotke kromok tortsovmi shchetkami [Edge cutting forces with end brushes]. *Vestnik IrGTU*, Tom 21, no. 12, 2017, pp. 22–42.

11. Dimov Yu.V. Obrabotka detalei elastichnym instrumentom: spravochnik [Workpiece machining with elastic tools]. Irkutsk: Izdatelstvo IrGTU, 2013, 484 p.

12. S.I. Diadia et al. Diadia S.I. Obosnovanie vybora polimerno-abrazivnogo instrumenta dlia vypolneniia otdelechnykh operatsii [Justification for choosing a polymer-abrasive tool for finishing operations]. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. Zaporozh'e: Izd-vo zaporozhskogo nats. tekhn. un-ta, 2010, no. 2, pp. 145–148.

13. Kitov A.K. Opredelenie geometricheskikh i silovykh parametrov kontakta vorsa polimerno-abrazivnoi shchetki s poverkhnost'iu detali [Determination of geometrical and power parameters of the polymer-abrasive brush pile contact with the surface of the part]. *Mekhanika deformiruemykh sred v tekhnologicheskikh protsessakh*. Irkutsk: 1997, pp. 23–28.

14. Kitov A.K. Izmeritel'nyi kompleks dlia opredeleniia parametrov kontakta vorsa instrumenta s poverkhnost'iu detali [Measuring complex for determination of parameters of pile tool contact with workpiece surface]. *Mekhanika deformiruemykh sred v tekhnologicheskikh protsessakh*. Irkutsk, 1997, pp. 103–107.

15. Kitov A.K. K voprosu o mekhanicheskikh kharakteristikakh polimerno-abrazivnykh vorsin [On the question of mechanical characteristics of polymer-abrasive pile]. *Mekhanika deformiruemykh sred v tekhnologicheskikh protsessakh*. Irkutsk, 1997, pp. 79–82.

16. Makarov V.F., Vinogradov A.V. Izmerenie profil'na skruglennykh kromok obratstvov pri issledovanii obrabotki kromok diskov GTD abrazivno-polimernymi shchetkami [Profile measurement of rounded specimen edges during edge treatment of GTE discs with abrasive polymer brushes]. *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 2, pp. 106–115.

17. Pini B.E., Iakovlev D.R. O nekotorykh tekhnologicheskikh vozmozhnostiakh shchetok s abrazivno-polimernym voloknom [About some technological possibilities of brushes with abrasive polymeric fibers]. *Izvestiia MGTU «MAMI»*, no. 1 (7), 2009, pp. 148–151.

18. Provolotskii A.E., Negrub S.L. Ispol'zovanie poli-merabrazivnogo elastichnogo instrumenta na operatsiakh chistovoi obrabotki [Use of polymer abrasive flexible tools in finishing operations]. *Vestnik khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2006, no. 33, pp. 106–108.

19. Stepanov D.N. Vliianie parametrov polimerno-abrazivnogo instrumenta i rezhimov obrabotki na sherokhova-

nost' poverkhnosti titanovogo splava VT8-M [Influence of polymer-abrasive tool parameters and processing modes on surface roughness of titanium alloy BT8-M]. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni, Zaporozh'e*, 2012, no. 2, pp. 87–90.

20. Ustinovich, D.F. Elastichnyi abrazivnyi instrument dlia otdelechno-zachistnoi obrabotki [Elastic abrasive tools for finishing and finishing work]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniia i obrabotki materialov: materialy II mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* Minsk: 2007, pp. 142–146.

21. Ustinovich, D.F., Pribyl'skii V.I., Mochailo A.G. Elastichnyi polimerno-abrazivnyi instrument s diskretnym rezhushchim konturom [Elastic polymer-abrasive tool with discrete cutting contour]. *Mashinostroenie i tekhnosfera KhKhI veka*. DonNTU. Donetsk, 2008, vol. 3, pp. 241–244.

22. Ustinovich D.F. Eksperimental'noe issledovanie kachestva ploskikh poverkhnostei pri obrabotke diskovymi abrazivnymi shchetkami [Experimental study of the quality of flat surfaces when blasting with disc abrasive brushes]. *Vestnik polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriia V: promyshlennost'. Prikladnye nauki*. no. 8, 2009, pp. 130–134.

23. Ustinovich D.F. Pribyl'skii V.I. Zavisimosti moshchnosti ot rezhimov shlifovaniia polimerno-abrazivnymi diskovymi shchetkami [Power dependencies on grinding modes with polymer-abrasive wheel brushes]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2012, no. 1 (18), pp. 75–79.

24. Chapyshev A.P., Ivanova, A.V. Kriuchkin A.V. Tekhnologicheskie vozmozhnosti protsessov mekhanizirovannoi finishnoi obrabotki detalei [Technological possibilities of the processes of mechanized bath finishing of the parts]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2013, vol. 15, no. 6 (2), pp. 533–537.

25. Chapyshev A.P., Starobutseva D.A. Programmnyi modul' naznacheniia rezhimov finishnoi obrabotki s primeneniem avtomaticheskikh shchetochnykh statsionarnykh ustanovok [Software module for assigning finishing modes using automatic brush stationary machines]. *Vestnik permskogo nats. issledovatel'skogo politekhn. un-ta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2016, vol. 18, no. 2, pp. 21–37.

26. Iakovlev D.R., Pini B.E. O vzaimodeistvii volokna abrazivno-polimerno-i shchetki s obrabatyvaemoi poverkhnost'iu [On the interaction between the abrasive polymer brush fibre and the surface to be treated]. *Izvestiia MGTU «MAMI»*, 2009, no. 2 (8), pp. 184–187.

Получено 10.02.2020

Опубликовано 25.03.2020

#### Сведения об авторе

**Подасhev 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 author

**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.