

Подашев Д.Ю. Оценка качества поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов после обработки эластичными полимерно-абразивными кругами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 75–86. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.10

Podashev D.B. Quality assessment of the surface layer of aluminum alloy after processing elastic polymer-abrasive wheels. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 75–86. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.10

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 4, 2020**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.10  
УДК 621.923: 621.922

**Д.Б. Подашев**

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск, Россия

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ  
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЭЛАСТИЧНЫМИ  
ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ**

Рассмотрено исследование влияния режимов обработки на такие показатели качества поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов, как шероховатость поверхности и остаточные напряжения.

При проведении экспериментальных исследований использовались эластичные полимерно-абразивные круги компании 3М марок FS-WL, DB-WL, CF-FB.

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что поперечная шероховатость по параметру Ra увеличивается с ростом деформации круга. Это объясняется тем, что с увеличением деформации растет вертикальная составляющая силы, а следовательно, увеличивается глубина внедрения единичных зерен в обрабатываемый материал. С увеличением скорости резания поперечная шероховатость по параметру Ra также растет. Это объясняется тем, что с увеличением скорости растет центробежная составляющая силы удара абразивного зерна по обрабатываемой поверхности. В ходе проведения статистической обработки экспериментальных данных доказано, что от продольной подачи поперечная шероховатость не зависит.

Дисперсионным анализом результатов экспериментов доказано, что продольная шероховатость по параметру Ra для всех использованных эластичных полимерно-абразивных кругов не зависит от заданных режимов обработки.

В результате проведенных исследований получена эмпирическая зависимость, которая позволяет прогнозировать ожидаемую шероховатость при проектировании технологического процесса изготовления детали.

Проведены исследования процесса формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из алюминиевого сплава В95ПчТ2 при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами. В результате установлено, что при обработке эластичными полимерно-абразивными кругами образцов, полученных цилиндрическим и торцевым фрезерованием, остаточные напряжения оказываются полностью переформированы. С учетом того, что данный процесс обработки происходит на очень тонком разупрочненном поверхностном слое, доказано, что в обрабатываемом материале возникают сжимающие остаточные напряжения на малой глубине залегания, что положительно влияет на эксплуатационные свойства деталей.

Проведен анализ состояния поверхностного слоя при помощи металлографической и электронной микроскопии. На основании данных исследований сделан вывод о том, что случаи потемнения обрабатываемой детали из алюминиевого сплава не могут препятствовать внедрению зачистки поверхностей полимерно-абразивными инструментами в авиационной промышленности, поскольку все присутствующие на поверхности частицы легко удаляются при подготовке к анодированию.

**Ключевые слова:** эластичный полимерно-абразивный круг, шероховатость поверхности, режимы обработки, деформация круга, скорость резания, остаточные напряжения, главные напряжения, касательные напряжения, спектральный анализ, электронная микроскопия.

D.B. Podashev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

## QUALITY ASSESSMENT OF THE SURFACE LAYER OF ALUMINUM ALLOY AFTER PROCESSING ELASTIC POLYMER-ABRASIVE WHEELS

The article examines the study of the processing modes influence on such indicators of the quality of the surface layer of parts made of aluminum alloys, such as surface roughness and residual stresses.

During the experimental studies, we used 3M elastic polymer-abrasive wheels of the FS-WL, DB-WL, CF-FB brands.

As a result of experimental studies, it was found that the transverse roughness in the parameter Ra increases with increasing deformation of the circle. This is due to the fact that with an increase in deformation, the vertical component of the force grows, and, consequently, the depth of penetration of single grains into the processed material increases. As the cutting speed increases, the Ra transverse roughness also increases. This is due to the fact that with increasing speed, the centrifugal component of the impact force of the abrasive grain on the treated surface increases. In the course of statistical processing of the experimental data, it was proved that the transverse roughness does not depend on the longitudinal feed.

An analysis of variance of the experimental results proved that the longitudinal roughness in terms of the Ra parameter for all used elastic polymer-abrasive wheels does not depend on the specified processing modes.

As a result of the research carried out, an empirical dependence was obtained, which allows predicting the expected roughness when designing a technological process for manufacturing a part.

The study of the formation of residual stresses in the surface layer of parts made of aluminum alloy V95PchT2 during processing with elastic polymer-abrasive wheels. As a result, it was found that when the samples obtained by cylindrical and face milling with elastic polymer-abrasive wheels are processed, the residual stresses are completely re-formed. Considering that this processing process takes place on a very thin softened surface layer, it has been proven that compressive residual stresses arise in the processed material at a shallow depth of occurrence, which has a positive effect on the operational properties of parts.

The analysis of the state of the surface layer was also carried out using metallographic and electron microscopy. Based on these studies, it was concluded that the cases of darkening of the workpiece made of aluminum alloy cannot prevent the introduction of surface cleaning with polymer-abrasive tools in the aviation industry, since all particles present on the surface are easily removed during preparation for anodizing.

**Keywords:** elastic polymer-abrasive wheel, surface roughness, processing modes, wheel deformation, cutting speed, residual stresses, principal stresses, shear stresses, spectral analysis, electron microscopy.

Финишная обработка деталей из алюминиевых сплавов по зачистке поверхностей с целью уменьшения параметров шероховатости, устранения дефектов на поверхностном слое от предыдущей операции, удаления заусенцев и скругления кромок может эффективно осуществляться вращающимися абразивными инструментами на гибкой (полимерной) связке. Изучению процесса взаимодействия эластичных полимерно-абразивных кругов с обрабатываемой поверхностью посвящен ряд работ [1–19]. Однако на сегодняшний день недостаточно изучен вопрос формирования поверхностного слоя деталей при таком виде обработки.

Для научно обоснованного выбора эластичных полимерно-абразивных инструментов и режимов обработки необходимы знания об их влиянии на показатели качества поверхностного слоя.

### Шероховатость обработанной поверхности

Достижимая шероховатость формируется в процессе обработки независимо от исходного состояния обрабатываемой поверхности. Ее параметры зависят от условий, режимов обработки, а также свойств обрабатываемого материала. Если шероховатость поверхности до обработки была меньше достижимой, то в процессе обработки она увеличивается; если больше, то уменьшается до значения достижимой [20–22].

Для проведения экспериментальных исследований использовались эластичные полимерно-абразивные круги компании 3M, показанные на рис. 1–3 и изготовленные из абразивного материала Scotch-Brite™. Параметры данных эластичных полимерно-абразивных кругов приведены в табл. 1.



Рис. 1. Прессованные круги марки FS-WL



Рис. 2. Прессованный круг марки DB-WL



Рис. 3. Лепестковый круг марки CF-FB

Таблица 1

Параметры эластичных полимерно-абразивных кругов

Круг	$D_k$ , мм	$B_k$ , мм	$r_k$ , мм	$d_k$ , мм	$M_k$ , кг	$\gamma_k$ , кг/м <sup>3</sup>	Абразив	Зернистость $Z$ , мкм
FS-WL-8AMED	140,5	26	17,5	25,4	0,278	712,77	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50–60
FS-WL-6SFIN	129,5	25,5	17,5	25,4	0,162	501,63	SiC	45–50
FS-WL-2SCRS	147,2	26	17,5	25,4	0,162	377,37	SiC	~200
DB-WL-8SMED	147,8	25,6	17,5	25,4	0,284	666,29	SiC	50–60
CF-FB-0,5AFIN	193	50	45	76,5	0,418	339,03	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45–50

Примечание:  $D_k$  – диаметр круга, мм;  $B_k$  – ширина круга, мм;  $r_k$  – радиус втулки круга, мм;  $d_k$  – диаметр отверстия, мм;  $M_k$  – масса круга, кг;  $\gamma_k$  – плотность материала круга, кг/м<sup>3</sup>.

В качестве обрабатываемого материала использован сплав В95пчТ2, как типовой представитель высокопрочных алюминиевых сплавов, широко применяемых в авиастроении.

Эксперименты по установлению зависимостей шероховатости по параметру  $R_a$  от режимов обработки проводились на опытных образцах, представляющих собой пластины размером  $3 \times 20 \times 100$  мм (рис. 4) на вертикальном обрабатывающем центре Deckel Maho DMC 635V.

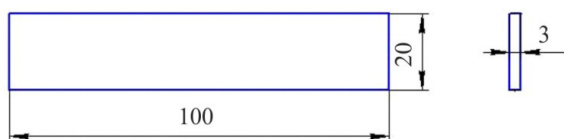


Рис. 4. Опытный образец

вается глубина внедрения единичных зерен в обрабатываемый материал.

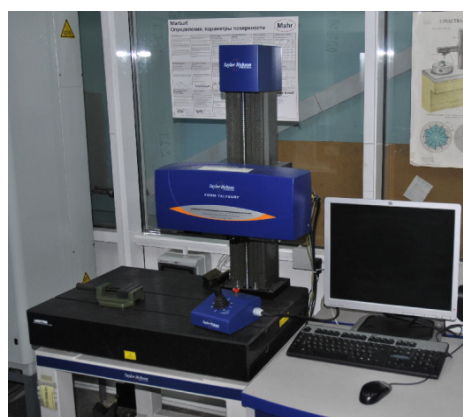


Рис. 5. Профилограф-профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200

Продольная и поперечная шероховатость по параметру  $R_a$  измерялась на профилографе-профилометре Taylor Hobson Form Talysurf i200 (рис. 5).

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что поперечная шероховатость по параметру  $R_a$  увеличивается с ростом деформации круга (рис. 6). Это объясняется тем, что с увеличением деформации растет вертикальная составляющая силы, а следовательно, увеличи-

С увеличением скорости резания поперечная шероховатость по параметру  $R_a$  также растет (рис. 7). Это объясняется тем, что с увеличением скорости растет центробежная составляющая силы удара абразивного зерна по обрабатываемой поверхности.

От продольной подачи поперечная шероховатость не зависит. Это видно на рис. 8 и подтверждено дисперсионным анализом при доверительной вероятности 0,95 [23], результаты которого приведены в табл. 2.

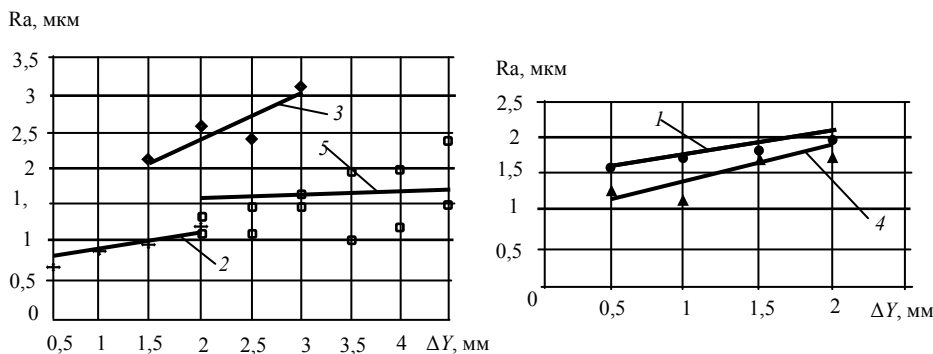


Рис. 6. Зависимость параметра шероховатости  $R_a$  от деформации  $\Delta Y$  при  $S = 130$  мм/мин для кругов: 1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин; 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин; 3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 464,4$  м/мин; 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин; 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин

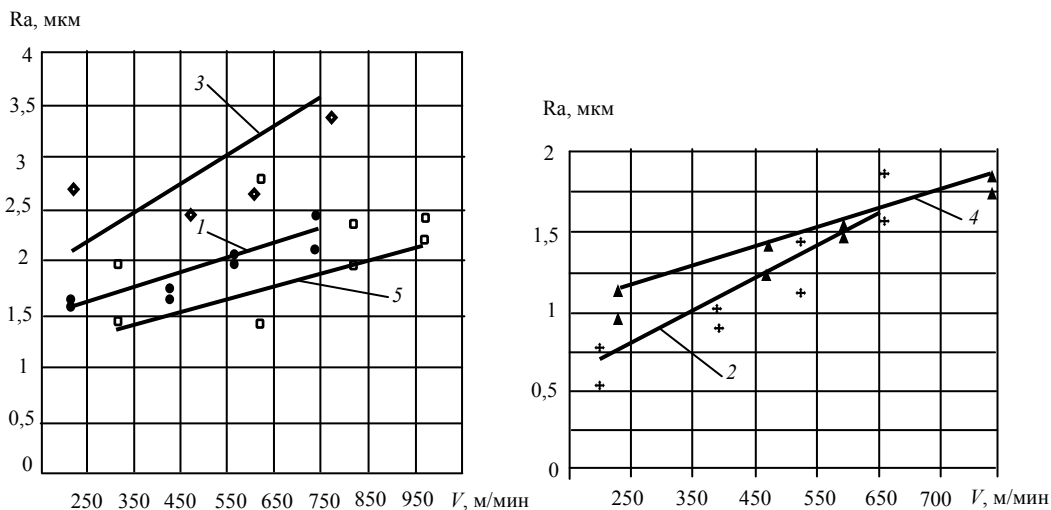


Рис. 7. Зависимость параметра шероховатости Ra от скорости резания  $V$  при подаче  $S = 130$  мм/мин для кругов: 1 – FS-WL 8A MED при  $\Delta Y = 1,5$  мм; 2 – FS-WL 6S FIN при  $\Delta Y = 1,5$  мм; 3 – FS-WL 2S CRS при  $\Delta Y = 2,5$  мм; 4 – DB-WL 8S MED при  $\Delta Y = 1,5$  мм; 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $\Delta Y = 4$  мм

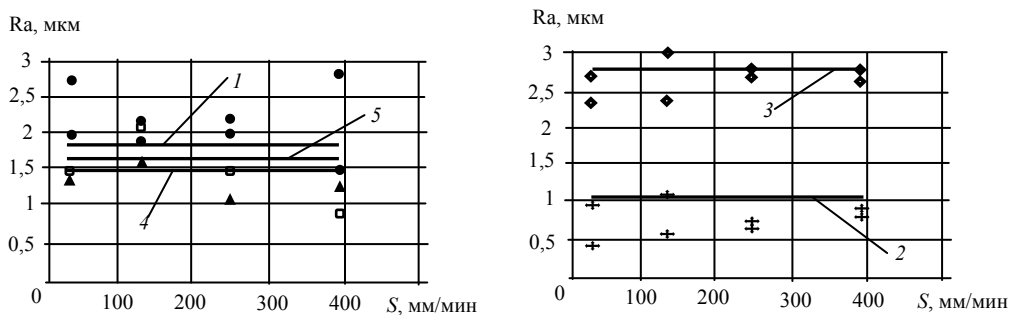


Рис. 8. Зависимость параметра шероховатости Ra от продольной подачи  $S$  для кругов: 1 – FS-WL 8A MED при  $V = 441,4$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм; 2 – FS-WL 6S FIN при  $V = 406,8$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм; 3 – FS-WL 2S CRS при  $V = 457,9$  м/мин,  $\Delta Y = 2,5$  мм; 4 – DB-WL 8S MED при  $V = 464,3$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм; 5 – CF-FB 0,5A FIN при  $V = 606,3$  м/мин,  $\Delta Y = 4$  мм

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа зависимостей Ra от подачи  $S$

Марка круга	Функция	$S_A^2$ , мкм <sup>2</sup>	$S_0^2$ , мкм <sup>2</sup>	$F = S_A^2/S_0^2$	Значимость влияния фактора
FS-WL 8AMED	Ra = f(S)	0,053	0,259	0,204	Не значимо
FS-WL 6SFIN		0,036	0,044	0,812	Не значимо
FS-WL 2SCRS		0,127	0,096	1,327	Не значимо
DB-WL 8SMED		0,145	0,072	2,007	Не значимо
CF-FB 0,5AFIN		0,263	0,125	2,106	Не значимо

Полученные зависимости шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra аппроксимированы выражением

$$Ra = a_1\Delta Y^2 + a_2V^2 + a_3\Delta Y + a_4V + a_5\Delta YV + a_6, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\Delta Y$  – деформация круга, мм.

Значения коэффициентов  $a_1$ – $a_5$  и свободного члена  $a_6$  уравнения (1) приведены в табл. 3.

Исследования достижимой продольной шероховатости показали, что  $Ra_{\text{прод}}$  для всех использованных эластичных полимерно-абразивных кругов не зависит от заданных режимных параметров обработки.

Таблица 3

Значения коэффициентов и свободного члена в уравнении (1)

Коэффициент	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	CF-FB 0,5A FIN	DB-WL 8S MED	FS-WL 2S CRS
$a_1$	0,053 265 41	$2,898 29 \cdot 10^{-3}$	$6,666 67 \cdot 10^{-3}$	0,106 131 15	0,098 297
$a_2$	$1,132 \cdot 10^{-6}$	$9,908 57 \cdot 10^{-7}$	$6,666 67 \cdot 10^{-7}$	$-1,556 15 \cdot 10^{-7}$	$6,746 \cdot 10^{-7}$
$a_3$	0,031 161 26	$6,125 33 \cdot 10^{-6}$	0,019 68	0,064 689 23	0,0131 788
$a_4$	$-1,2031 \cdot 10^{-4}$	$3,8861 \cdot 10^{-4}$	$7,317 43 \cdot 10^{-5}$	$9,905 \cdot 10^{-4}$	$6,061 \cdot 10^{-4}$
$a_5$	$4,9298 \cdot 10^{-4}$	$4,531 83 \cdot 10^{-4}$	$2,792 89 \cdot 10^{-5}$	$2,3847 \cdot 10^{-4}$	$5,708 \cdot 10^{-4}$
$a_6$	1,201 14	0,45	1,11	0,6	1,02427

Таблица 4

Доверительные границы достижимой  $Ra_{\text{прод}}$  и предельные экспериментальные значения

Марка круга	$Ra_{\text{прод}}$	Ra (max)	Ra (min)
FS-WL-8AMED	$0,02 \leq M (Ra_{\text{прод}}) \leq 0,478$	0,49	0,06
FS-WL-6SFIN	$0,018 \leq M (Ra_{\text{прод}}) \leq 0,508$	0,59	0,07
FS-WL-2SCRS	$0,124 \leq M (Ra_{\text{прод}}) \leq 0,68$	0,7	0,17
DB-WL-8SMED	$0 \leq M (Ra_{\text{прод}}) \leq 0,49$	0,47	0,06
CF-FB-0,5AFIN	$0,184 \leq M (Ra_{\text{прод}}) \leq 0,722$	0,69	0,22

Дисперсионным анализом результатов экспериментов доказано, что при уровне значимости  $P = 0,95$  по критерию Фишера влияния  $\Delta Y$ ,  $V$  и  $S$  на  $Ra_{\text{прод}}$  являются незначимыми. Численное значение достижимой продольной шероховатости зависит только от характеристик эластичного полимерно-абразивного круга (зернистость, жесткость и т.д.).

После исключения грубых промахов во всей совокупности экспериментальных данных, которые составляли от 48 до 72 измерений, с использованием квантилей Стьюдента определены доверительные границы достижимой  $Ra_{\text{прод}}$ . В табл. 4 приведены эти границы, а также предельные экспериментальные значения.

Таким образом, полученная эмпирическая зависимость (1) позволяет прогнозировать ожидаемую шероховатость при проектировании технологического процесса изготовления детали.

Если в технической документации на изделие есть ограничения по продольной шероховатости, то, пользуясь табл. 4, можно выбрать марку эластичного полимерно-абразивного круга, который позволит обеспечить требуемое значение продольной шероховатости.

#### Экспериментальное исследование остаточных напряжений

Исследования проведены на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2. Опытный образец (см. рис. 4) крепился в приспособлении с боковых сторон и обрабатывался периферией кругов CF-FB 0,5A FIN (см. рис. 3) и FS-WL 8A MED (см. рис. 1) при различных режимах.

Определялось распределение остаточных напряжений по глубине образца со стороны обработанной плоскости. Напряжения определялись вдоль (по оси  $Z$ ,  $\varphi = -45^\circ$ ), поперек (по оси  $X$ ,  $\varphi = +45^\circ$ ) и промежуточное по оси  $XZ$  при  $\varphi = 0^\circ$  (рис. 9). При этом измерены нормальные, касательные и главные напряжения во всех направлениях.

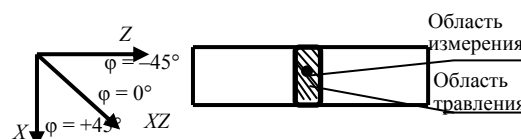


Рис. 9. Схема исследования остаточных напряжений

Исследования проводились на дифрактометре рентгеновском XSTRESS 3000 G3/G3R производства Stresstech OY (Финляндия) с рентгеновской трубкой TFS-3007-HP (рис. 10) и универсальным программным обеспечением для управления оборудованием и обработки данных.



Рис. 10. Дифрактометр рентгеновский XSTRESS 3000 G3/G3R

Измерения дифракции рентгеновских лучей, анализ и отчетность выполнялись в соответствии со стандартом EN 15305:2008. Non-destructive Testing. Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction (Неразрушающий контроль. Метод определения остаточных напряжений с помощью дифракции рентгеновских лучей).

Образцы перед обработкой эластичными полимерно-абразивными кругами фрезеровались четырехзубой фрезой при  $n = 1600$  об/мин,  $S = 130$  мм/мин, глубине резания 0,5 мм. Состояние остаточных напряжений образцов до обработки эластичными полимерно-абразивными кругами приведено

в табл. 5, из которой видно, что все нормальные остаточные напряжения являются растягивающими.

По результатам исследования образцов, обработанных эластичными полимерно-абразивными кругами, построены эпюры распределения остаточных напряжений по глубине залегания  $t$  в поверхностном слое, которые приведены на рис. 11 (после обработки кругом FS-WL-8A MED), а на рис. 12 – после обработки кругом CF-FB-0,5A FIN, по которым видно, что все нормальные остаточные напряжения являются сжимающими и уменьшающимися (по модулю) по глубине залегания.

Таблица 5

Остаточные напряжения в образцах до обработки эластичными полимерно-абразивными кругами

Метод обработки образца	$\sigma_z^0$ , МПа, вдоль $\varphi = -45^\circ$	$\sigma_x^0$ , МПа, поперек $\varphi = +45^\circ$	$\tau_{xz}^0$ , МПа, вдоль $\varphi = -45^\circ$	Главные напряжения	
				$\sigma_1^0$ , МПа	$\sigma_2^0$ , МПа
Цилиндрическое фрезерование	+31,1	+154,9	-76,7	+155,2	+30,8
Торцевое фрезерование	+48,9	+41,0	-63,4	+61,3	+28,6

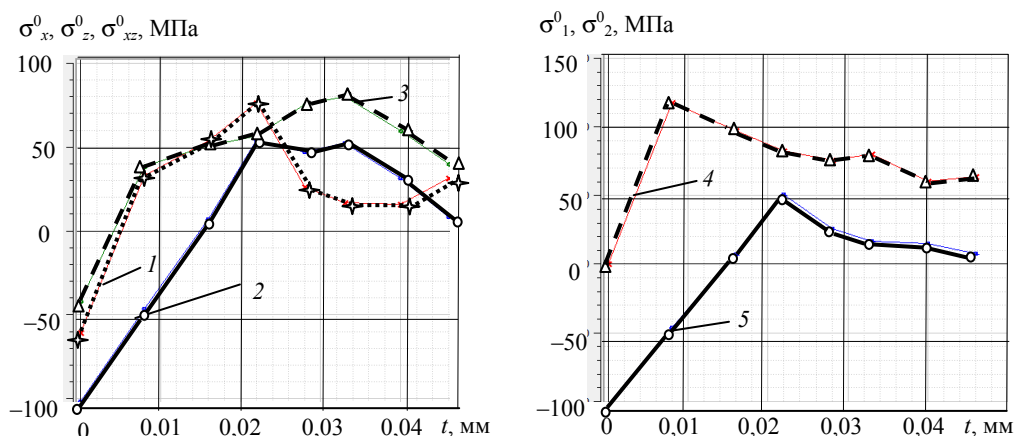


Рис. 11. Эпюры распределения остаточных напряжений по глубине залегания после обработки кругом FS-WL-8A MED при  $V = 11,77$  м/с,  $\Delta Y = 1$  мм,  $S = 21$  мм/мин: 1 –  $\sigma_z^0$  при  $\varphi = -45^\circ$ ; 2 –  $\sigma_{xz}^0$  при  $\varphi = 0$ ; 3 –  $\sigma_x^0$  при  $\varphi = +45^\circ$ ; 4 – максимальные главные напряжения  $\sigma_1^0$ ; 5 – минимальные главные напряжения  $\sigma_2^0$

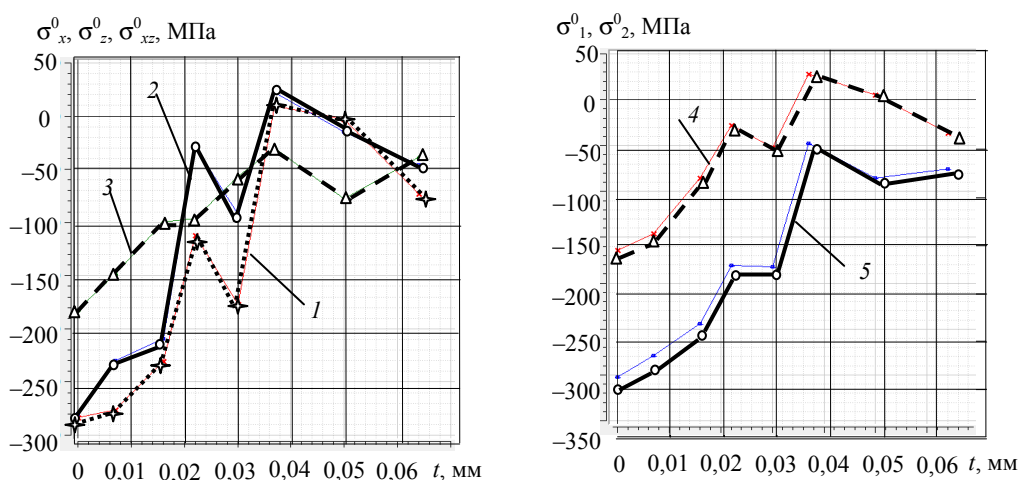


Рис. 12. Эпюры распределения остаточных напряжений по глубине залегания после обработки кругом CF-FB 0,5A FIN при  $V = 16,755$  м/с,  $\Delta Y = 3$  мм,  $S = 21$  мм/мин: 1 –  $\sigma_z^0$  при  $\varphi = -45^\circ$ ; 2 –  $\sigma_{xz}^0$  при  $\varphi = 0$ ; 3 –  $\sigma_x^0$  при  $\varphi = +45^\circ$ ; 4 – максимальные главные напряжения  $\sigma_1^0$ ; 5 – минимальные главные напряжения  $\sigma_2^0$



Результаты измерения остаточных напряжений приведены в табл. 6 и 7.

Анализ касательных напряжений показал, что данные напряжения всегда сжимающие и практически не изменяются по глубине залегания и не меняются в зависимости от параметров обработки (скорости резания и деформации круга). До обработки эластичными полимерно-абразивными кругами касательные напряжения были в пределах 65–70 МПа, после обработки эластичным полимерно-абразивным кругом зафиксировано их колебание от 55 до 78 МПа.

При обработке кругом FS-WL-8A MED остаточные напряжения вдоль образца ( $\sigma_z^0$  при  $\varphi = -45^\circ$ ) и минимальные главные напряжения  $\sigma_2^0$  оказались сжимающими, а поперек образца ( $\sigma_x^0$  при  $\varphi = +45^\circ$ ) и максимальные главные напряжения  $\sigma_1^0$  при некоторых режимах – растягивающими. Это видно по результатам, приведенным в табл. 6.

В процессе обработки кругом FS-WL-8A MED на формирование остаточных напряжений существенное влияние оказал температурный фактор, поскольку в зоне резания действовали значительные температуры, что и послужило причиной появления малых сжимающих и растягивающих остаточных напряжений.

В результате обработки кругом CF-FB-0,5A FIN в поверхностном слое сформированы сжимающие нормальные остаточные напряжения. Это видно по данным наибольших (по модулю) остаточных напряжений на поверхности образца, приведенным в табл. 7. При обработке кругом CF-FB-0,5A FIN температура в зоне резания мала и существенного влияния на остаточные напряжения оказать не могла. Следовательно, главным фактором является нормальная составляющая силы, под действием которой формируются сжимающие остаточные напряжения.

Таблица 6

Результаты экспериментального определения остаточных напряжений после обработки кругом FS-WL 8A MED при  $S = 21$  мм/мин

$V$ , м/с	$\Delta Y$ , мм	$\sigma_z^0$ , МПа, вдоль, $\varphi = -45^\circ$	$\sigma_x^0$ , МПа, поперек, $\varphi = +45^\circ$	$\tau_{z,}^0$ , МПа, вдоль, $\varphi = -45^\circ$	Главные напряжения	
					$\sigma_1^0$ , МПа	$\sigma_2^0$ , МПа
3,53	1,5	-29,7	+41,5	-78,3	+43,9	-31,8
7,069		-23,1	+41,4	-71,8	+41,5	-23,2
8,831		-43,1	+34,7	-73,2	+37,4	-45,7
7,069	0,5	-49,9	-14,5	-52,8	+0,3	-64,7
	1,0	-60,7	-41,8	-75,5	0	-102,5
	1,5	-23,1	+41,4	-71,8	+41,5	-23,2
	2,0	-19,4	+43,2	-77,2	+67,2	-43,5

Таблица 7

Результаты экспериментального определения остаточных напряжений после обработки кругом CF-FB 0,5A FIN при  $S = 21$  мм/мин

$V$ , м/с	$\Delta Y$ , мм	$\sigma_z^0$ , МПа, вдоль, $\varphi = -45^\circ$	$\sigma_x^0$ , МПа, поперек, $\varphi = +45^\circ$	$\tau_{z,}^0$ , МПа, вдоль, $\varphi = -45^\circ$	Главные напряжения	
					$\sigma_1^0$ , МПа	$\sigma_2^0$ , МПа
5,053	4,5	-264	-51,4	-71,4	-36,9	-278,5
10,106		-183,9	-200,9	-69,9	-151,9	-232,9
12,632		-217,7	-178,8	-55,3	-143,2	-253,3
16,169		-204,1	-116,5	-65,6	-99,3	-221,3
10,106	3	-283,8	-182,4	-65,8	-163,9	-302,3
	3,5	-240,8	-87,9	-97,2	-70,2	-258,4
	4,0	-241,9	-107,7	-73,8	-87,1	-262,5
	4,5	-183,9	-200,9	-69,9	-151,9	-232,9

В целом следует отметить, что при обработке исследуемыми эластичными полимерно-абразивными кругами образцов, полученных цилиндрическим и торцевым фрезерованием (см. табл. 5), остаточные напряжения оказываются полностью переформированы. С учетом того, что данный процесс обработки происходит на очень тонком разупрочненном поверхностном слое, установлено, что в обрабатываемом материале возникают сжи-

мающие остаточные напряжения на малой глубине залегания.

Как известно [24, 25], сжимающие остаточные напряжения положительно влияют на эксплуатационные свойства изделий, следовательно, обработка эластичными полимерно-абразивными кругами оказывает положительное влияние на формирование качества поверхностного слоя по данному показателю.

### Анализ состояния поверхностного слоя при помощи металлографической и электронной микроскопии

При обработке образцов (см. рис. 4) эластичными полимерно-абразивными кругами на обработанной поверхности появляется незначительное потемнение. Необходимо установить, может ли данное явление повлиять на эксплуатационные свойства изделий. Первоначально предполагалось, что на поверхности образца остаются частицы полимерной связки в результате взаимодействия инструмента с материалом образца.

Для установления истинной причины такого явления были проведены исследования поверхностного слоя на электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500 (рис. 13) с детектором Oxford X-max и программой INCA Point ID, а также на металлографическом микроскопе «Микромед МЕТ-2» (рис. 14).

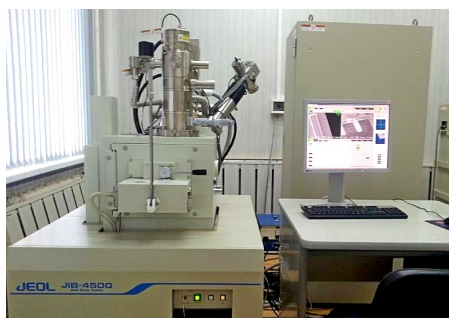
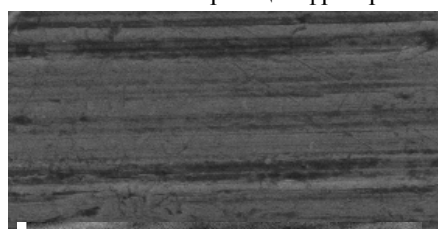


Рис. 13. Растровый электронный микроскоп JIB-Z4500 Multibeam



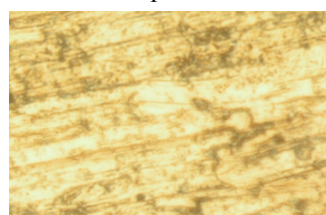
Рис. 14. Металлографический микроскоп «Микромед МЕТ-2»

Образец отфрезерован. Травлению не подвергался.



70 мкм

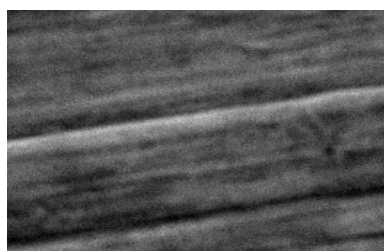
*a*



Увеличение  $\times 1000$

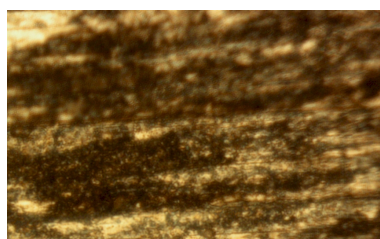
*б*

Образец обработан кругом DB-WL 8SMED.  $V = 479,09$  м/мин,  $\Delta Y = 2$  мм,  $S = 130$  мм/мин. Травлению не подвергался.



70 мкм

*в*



Увеличение  $\times 1000$

*г*

Рис. 15. Снимки поверхностей образцов, полученные на электронном (*a*, *в*) и металлографическом (*б*, *г*) микроскопах. См. также с. 83



Образец обработан кругом FS-WL-8AMED.  $V = 461,81$  м/мин,  $\Delta Y = 1,5$  мм,  $S = 130$  мм/мин.  
 Подверглся травлению: NaOH – 20 %, HNO<sub>3</sub> – 20 %.

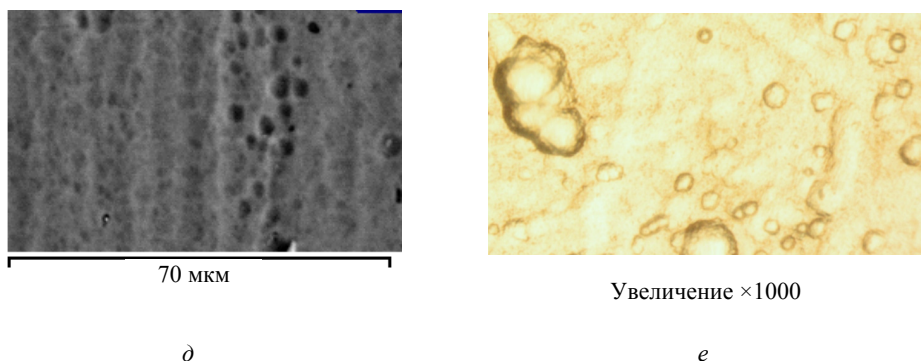


Рис. 15. Снимки поверхностей образцов, полученные на электронном (d) и металлографическом (e) микроскопах. Окончание

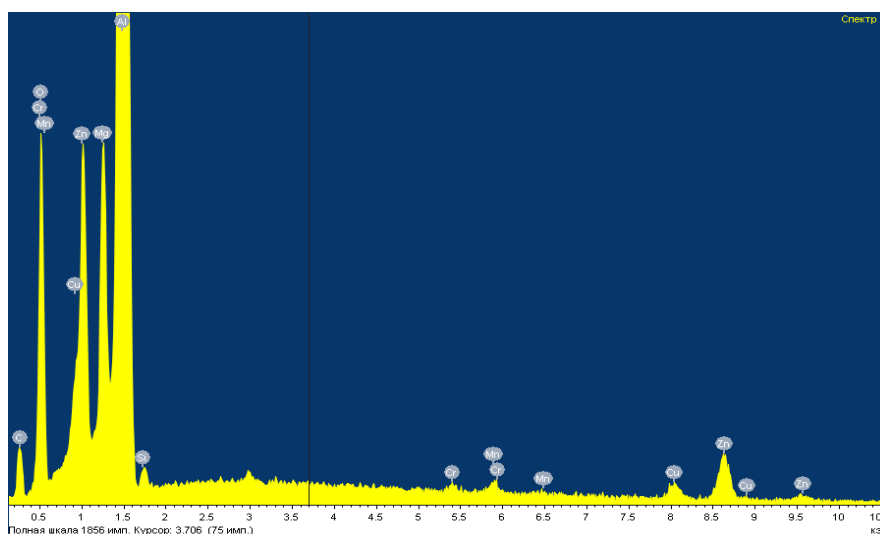


Рис. 16. Диаграмма спектрального анализа поверхностного слоя

Если проанализировать данные, полученные при помощи электронной микроскопии и приведенные в табл. 8, то можно сделать вывод о том, что потемнение связано с окислением алюминия при интенсивном взаимодействии инструмента с поверхностным слоем (химическое соединение с участием кислорода, алюминия и других элемен-

тов). Электронное изображение во вторичных электронах по кислороду составляет 14,71 %, а в отраженных электронах – 19,44 %, в необработанном образце кислорода содержится 1,53 и 2,60 % соответственно. После травления содержание кислорода становится практически таким же, как и у необработанного образца.

Таблица 8

Химический состав поверхностного слоя (все результаты средние в вес. %)

Образец	Электронное изображение в электронах	C	O	Mg	Al	Si	Mn	Cu	Zn
Фрезерован, не протравлен	вторичных	33,65	1,53	0,63	61,44	0,25	–	0,25	2,25
	отраженных	5,43	2,60	0,79	84,75	0,25	–	0,28	2,68
Обработан, не протравлен	вторичных	10,15	14,71	2,00	67,17	0,33	0,30	1,02	4,10
	отраженных	6,72	19,44	1,83	63,11	0,32	0,28	0,85	3,70
Обработан, протравлен	вторичных	19,68	2,13	1,80	70,46		0,41	1,07	4,46
	отраженных	8,74	1,16	2,01	81,60		0,31	1,26	4,92

### Заключение

Установлено, что исследованные эластичные полимерно-абразивные круги можно эффективно применять для обработки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, применяемых в авиастроении. Полученная в результате проведенных исследований эмпирическая зависимость, описывающая взаимосвязь шероховатости по параметру Ra с режимами обработки, позволяет прогнозировать ожидаемую шероховатость при проектировании технологического процесса изготовления детали.

Установлено, что при рассмотренном способе обработки в обрабатываемом материале возникают сжимающие остаточные напряжения на малой глубине залегания, что положительно влияет на эксплуатационные свойства деталей.

На основании проведенного анализа состояния поверхностного слоя при помощи металлографической и электронной микроскопии следует сделать вывод о том, что случаи потемнения обрабатываемой детали из алюминиевого сплава не могут препятствовать внедрению зачистки поверхностей полимерно-абразивными инструментами в авиационной промышленности, поскольку все присутствующие на поверхности частицы легко удаляются при подготовке к анодированию.

### Список литературы

1. Абрашкевич Ю.Д., Оглоблинский В.А., Оглоблинский А.В. Щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных // 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 // Сб. науч. тр. КНУБА. – 2006. – С. 60–65.
3. Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М. Эффективная эксплуатация полимерно-абразивной щетки // Вестник Харьков. нац. автомоб.-дорож. ун-та. – 2016. – Вып. 73. – С. 59–62.
4. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование качества поверхности при скруглении кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 9. – С. 23–34.
5. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование производительности процесса скругления кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник машиностроения. – 2017. – № 3. – С. 74–78.
6. 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.
7. 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. – Иркутск, 1997. – С. 23–28.

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

9. 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.

10. 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.

11. 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 октября 2007 г.; ГНУ «ФТИ НАНБ». – Минск, 2007. – С. 142–146.

12. 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 междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 15–20 сентября 2008 г.: в 4 т. / ДонНТУ. – Донецк, 2008. – Т. 3. – С. 241–244.

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

14. Чапышев А.П., Стародубцева 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.

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

16. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Edge forces in machining by abrasive brushes // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, no. 2. – P. 117–121.

17. Research on processing efficiency and contact characteristics of M300 steel surface grinding with elastic abrasives / X. Wu, Z. Chen, T. Zhou, C. Ma, X. Shu, J. Dong, J.G. Xuebao // Journal of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 54, iss. 1. – P. 171–177.

18. Wu X.-J., Zhou T.-Z., Tong Z.-X. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of m330 steel // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2017. – Vol. 14, iss. 11. – P. 5372–5377.

19. Experimental study on flexible abrasive grinding of M330 steel / X. Wu, X. Yu, R. Liu, Q. Wu, N. Jishu yu J. Gongcheng // Nanotechnology and Precision Engineering. – 2015. – Vol. 13, iss. 3. – P. 199–204.

20. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.

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

22. Димов Ю.В. Обработка деталей эластичным инструментом. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 352 с.

23. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

24. Гринченко М.И. Метод определения механических остаточных напряжений и его перспективы для создания эталона единицы механического остаточного напряжения // Вестник метролога. – 2016. – № 4. – С. 19–23.

25. Технология финишной обработки, качество поверхностного слоя и прочностные свойства лопаток паровых и газовых турбин / В.Е. Михайлов [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2015. – № 5. – С. 7–10.

### References

1. Abrashkevich Iu.D., Ogloblinskii V.A., Ogloblinskii A.V. Shchetochnye instrumenty na osnove poli-merno-abrazivnykh [Brushing tools based on polymer-abrasive materials]. *Mir tekhniki i tekhnologii*, 2006, no. 5, pp. 50–52.

2. Abrashkevich Iu.D., Pelevin L.E., Machishin G.N. Polimerno-abrazivnye shchetochnye instrumenty dlia obrabotki metallicheskih i nemetallicheskih poverkhnostei [Polymer-abrasive brush tools for metal and non-metal surface treatment]. *Sbornik nauchnykh trudov. KNUBA*, 2006, pp. 60–65.

3. Abrashkevich Iu.D., Machishin G.M. Effektivnaia ekspluatatsiia polimerno-abrazivnoi shchetki [Efficient operation of polymer-abrasive brush]. *Vestnik Khar'kovskogo nats. avtomob.-dorozh. Universiteta*, 2016, iss. 73, pp. 59–62.

4. Dimov Iu.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.

5. 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 mashinostroeniia*, 2017, no. 3, pp. 74–78.

6. S.I. Diadia et al. Obosnovanie vybora polimerno-abrazivnogo instrumenta dlia vypolneniia otdelochnykh operatsii [Justification for choosing a polymer-abrasive tool for finishing operations]. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*, 2010, no. 2, pp. 145–148.

7. 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 deformirue-mykh sred v tekhnologicheskikh protsessakh*. Irkutsk, 1997, pp. 23–28.

8. Makarov V.F., Vinogradov A.V. Izmerenie pro-filia skruglennykh kromok obraztsov pri issledovanii obrabotki kromok diskov GTD abrazivno-polimernymi shchetkami [Measuring the profile of rounded edges of samples in the study

of GTE disk edge treatment with abrasive polymer brushes]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 2, pp. 106–115.

9. Provolotskii A.E., Negrub S.L. Ispol'zovanie polimerabrazivnogo elastichnogo instrumenta na operatsiakh chistovoi obrabotki [Use of polymer abrasive flexible tools in finishing operations]. *Vestnik Khar'kovskogo nats. avto-mob.-dorozh. Universiteta*, 2006, no. 33, pp. 106–108.

10. Stepanov D.N. Vliianie parametrov polimerno-abrazivnogo instrumenta i rezhimov obrabotki na she-rokhovatosť poverkhnosti titanovogo splava VT8-M [Influence of polymer-abrasive tool parameters and processing modes on surface roughness of titanium alloy VT8-M]. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashino-buduvanni*, 2012, no. 2, pp. 87–90.

11. Ustinovich D.F. Elastichnyi abrazivnyi instrument dlia otdelochno-zachistnoi obrabotki [Elastic abrasive tool for finishing and finishing work]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniia i obrabotki materialov*. Minsk, 2007, pp. 142–146.

12. Ustinovich D.F., Pribyl'skii V.I., Mochai-lo A.G. Elastichnyi polimerno-abrazivnyi instrument s diskretnym rezhushchim konturom [Elastic polymer-abrasive tool with discrete cutting contour]. *Mashinostroenie i tekhnosfera KhKhI veka: sb. tr. 15 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* Donetsk, 2008, vol. 3, pp. 241–244.

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

14. Chapyshev A.P., Starodubtseva D.A. Programmnyi modul' naznacheniia rezhimov finisnoi obrabotki s primeneniem avtomaticheskikh shchetochnykh stacionarnykh ustanovok [Software module for assigning finishing modes using automatic brush stationary machines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 21–37.

15. Iakovlev D.R., Pini B.E. O vzaimodeistvii volokna abrazivno-polimernoii shchetki s obrabatyvaemoi poverkhnost'iu [About interaction of abrasive polymer brush fibers with the surface to be treated]. *Izvestiia MGTU «MAMI»*, 2009, no. 2 (8), pp. 184–187.

16. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Edge forces in machining by abrasive brushes. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 117–121.

17. Wu X., Chen Z., Zhou T., Ma C., Shu X., Dong J., Xuebao J.G. Research on processing efficiency and contact characteristics of M300 steel surface grinding with elastic abrasives. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 54, iss. 1, pp. 171–177.

18. Wu X.-J., Zhou T.-Z., Tong Z.-X. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of m330 steel. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2017, vol. 14, iss. 11, pp. 5372–5377.

19. Wu X., Yu X., Liu R., Wu Q., Jishu N., Gongcheng J. Experimental study on flexible abrasive grinding of M330 steel. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, vol. 13, iss. 3, pp. 199–204.

20. Babichev A.P. Vibratsionnaia obrabotka detalei [Vibratory machining of parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 136 p.

21. Dimov Iu.V. Obrabotka detalei svobodnym abrazivom [Processing of parts with free abrasive]. Irkutsk: Izdatelstvo IrGTU, 2000, 293 p.

22. Dimov Iu.V. Obrabotka detalei elastichnym instrumentom [Machining parts with elastic tools]. Irkutsk: Izdatelstvo IrGTU, 2007, 352 p.

23. Pustyl'nik E.I. Statisticheskie metody ana-liza i obrabotki nabliudenii [Statistical methods of analysis and processing of observations]. Moscow: Nauka, 1968, 288 p.

24. Grinchenko M.I. Metod opredeleniia mekhanicheskikh ostatochnykh napriazhenii i ego perspektivy dlia sozdaniia etalona edinitsy mekhanicheskogo ostatochnogo napriazheniia [Method for determining mechanical residual stresses and its prospects for creating a standard unit of mechanical residual stress]. *Vestnik metrologa*, 2016, no. 4, pp. 19–23.

25. V.E. Mikhailov et al. Tekhnologiya finishnoi obrabotki, kachestvo po-verkhnostnogo sloia i prochnostnye svoistva lopatok pa-rovykh i gazovykh turbin [Finishing technology, surface layer quality and strength properties of steam and gas turbine blades]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2015, no. 5, pp. 7–10.

Получено 03.11.2020

Опубликовано 10.12.2020

#### Сведения об авторе

**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 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.