

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.02

УДК 621.923: 621.922

**А.П. Чапышев, Д.А. Стародубцева**Иркутский национальный исследовательский  
технический университет, Иркутск, Россия

## **ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ НАЗНАЧЕНИЯ РЕЖИМОВ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЩЕТОЧНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ УСТАНОВОК**

Механическая обработка деталей машин из металлических материалов, выполняемая методом снятия стружки, в большинстве случаев сопровождается образованием остаточных заусенцев и острых краев (кромки) на пересечении обрабатываемых поверхностей. Детали в этом случае подлежат последующей доработке (зачистке) различными методами и инструментами с целью получения регламентированной величины радиуса (фаски) на кромках либо высоты остаточного заусенца.

Выполнение зачистки позволяет повысить потребительские свойства деталей и собранных узлов, снизить опасность травматизма при контакте с деталями, улучшить качество нанесения на детали защитных покрытий.

В частности, при производстве деталей авиационной техники с целью повышения производительности зачистки перспективным направлением является внедрение автоматических стационарных установок. В большинстве случаев применение подобного оборудования для обработки соответствующей номенклатуры деталей (с учетом их материала и геометрии) требует проведения технологических испытаний для отработки режимов. Режимы обработки отрабатываются на специально подготовленных технологических деталях либо тестовых образцах.

Большой объем экспериментальных данных по выявлению закономерностей процесса обработки с помощью установки для зачистки деталей абразивными щетками на Иркутском авиационном заводе потребовал систематизации полученных результатов, составления алгоритма подбора параметров обработки. В связи с этим был разработан программный модуль, использование которого при назначении режимов финишной обработки на щеточных установках позволяет обеспечить стабильное качество поверхности деталей, снизить до минимума последующую ручную доработку, оптимизировать производственные затраты на ремонт установок и приобретение инструмента (абразивных щеток).

Принцип, используемый в разработанном программном модуле, может быть успешно применен при назначении режимов для других видов обработки деталей, когда количественные значения параметров вынужденно изменяются в процессе обработки детали либо подвержены влиянию (в известных пределах) внешних факторов.

Апробация программного модуля назначения режимов финишной обработки была выполнена путем проведения технологических испытаний с применением щеточной установки Fladder 400/Gyro и доказала свою пригодность в производственных условиях.

**Ключевые слова:** программный модуль, финишная обработка, зачистка, остаточный заусенец, назначение режимов обработки, скругление кромок, удаление заусенцев, абразивные щетки, щеточные установки, качество поверхности.

**A.P. Chapyshev, D.A. Starodubtseva**

Irkutsk National Research Polytechnic University, Irkutsk, Russian Federation

## **THE PROGRAM MODULE DESIGNATED PROCESSING CONDITIONS FINISHING EMPLOYING AUTOMATIC BRUSHING STATIONARY INSTALLATION**

Process machining machine parts made of metallic materials performed by removing material, in most cases accompanied by the formation of residual burrs and sharp edges (edges) at the intersection of the processed surfaces. Details in this case are subject to subsequent refining (deburring) the various instruments and methods to obtain regulated the radius (chamfer) on the edges or residual burr height.

Performing deburring improves consumer properties of parts and assembled units, to reduce the risk of injury by contact with the items to improve the quality of the application to the details of protective coatings.

In particular, the production of components of aviation equipment in order to increase productivity deburring promising direction is the introduction of automatic stationary installations. In most cases, the use of such equipment for treatment of the corresponding range of parts (including its material and geometry) requires testing process for testing regimes. Processing modes are processed on specially prepared technological details or test samples.

A large amount of experimental data to identify patterns of by setting processing for cleaning parts with abrasive brushes at the Irkutsk Aviation Plant has demanded the systematization of the results, the development of the algorithm selecting processing parameters. In connection with what has been developed program module, which, with the appointment of finishing modes on brushed installations ensures consistent quality of the workpiece surface, to minimize subsequent manual rework, to optimize the production costs of repair facilities and the purchase of tools (abrasive brushes).

The principle used in the designed program module may advantageously be applied when assigning regimes for other processing details, quantitative parameters whose values change during the forced part or affected (within certain limits) to process external factors.

Testing of the program modes finishing shape destination module has been executed by performing technological tests using the brush installation Fladder 400 / Gyro and proved its usefulness in a production environment.

**Keywords:** program module, finished shape, deburring, residual burrs, purpose machining conditions, chamfered edge, deburring, abrasive brush, brushing machine, surface condition.

### **Введение**

Процесс финишной обработки деталей абразивными щетками, выполняемый с целью скругления острых кромок и удаления заусенцев, весьма популярен при изготовлении габаритных деталей машин простой формы [1–7].

При использовании автоматических щеточных установок машинное время процесса обработки зависит от выбранной скорости перемещения детали относительно вращающихся абразивных щеток [8]. Прочие параметры процесса обработки (частота вращения и осадка щеток) могут быть определены опытным путем для фиксированного

значения подачи с учетом конструкции и материала обрабатываемых деталей и конструктивных параметров абразивных щеток [2].

### Постановка задачи исследования

Технологические и конструктивные особенности большинства габаритных деталей авиационной техники (в частности, детали типа панель), вне зависимости от схемы их базирования, предполагают наличие диапазона положений обрабатываемых кромок по высоте относительно оси вращения щеток. Таким образом, для обрабатываемых кромок, находящихся в различных технологических условиях, т.е. имеющих различную высоту выступов относительно детали, при назначении одних и тех же режимов обработки (рис. 1) невозможно получение одинакового значения радиуса скругления  $R$ .

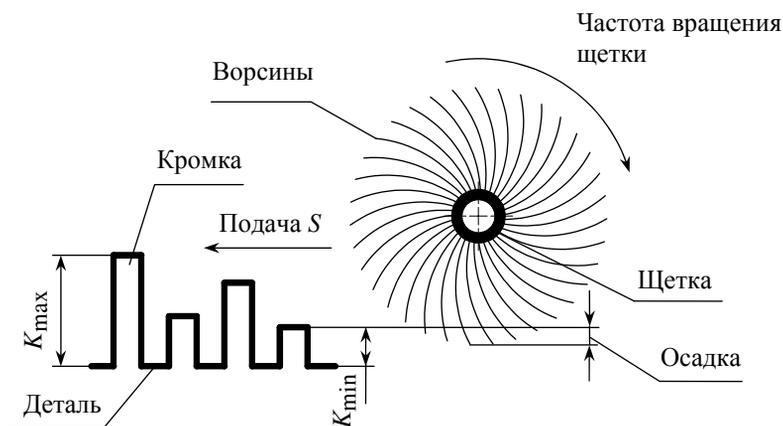


Рис. 1. Схема процесса обработки конструктивных элементов детали

В этом случае задача выбора режимов обработки состоит в определении некоторого допустимого диапазона радиусов кромок  $[R_{\min}, R_{\max}]$  для различных высот обрабатываемых кромок ( $K_{\min}, K_{\max}$ ) относительно базовой плоскости.

Решение может быть получено на основе экспериментальной информации [9–11] для технологически обусловленного диапазона высот обрабатываемых кромок  $[K_{\min}, K_{\max}]$ , допускаемого техническими характеристиками оборудования и используемых абразивных щеток.

Диапазон значений режимного параметра  $x$  (подачи) (ось абсцисс), которые будут обеспечивать требуемый диапазон радиусов кро-

мок  $[R_{\min}, R_{\max}]$ , может быть определен из экспериментальных зависимостей  $K_{\min} = f_1(x)$ ,  $K_{\max} = f_2(x)$  (рис. 2) [12].

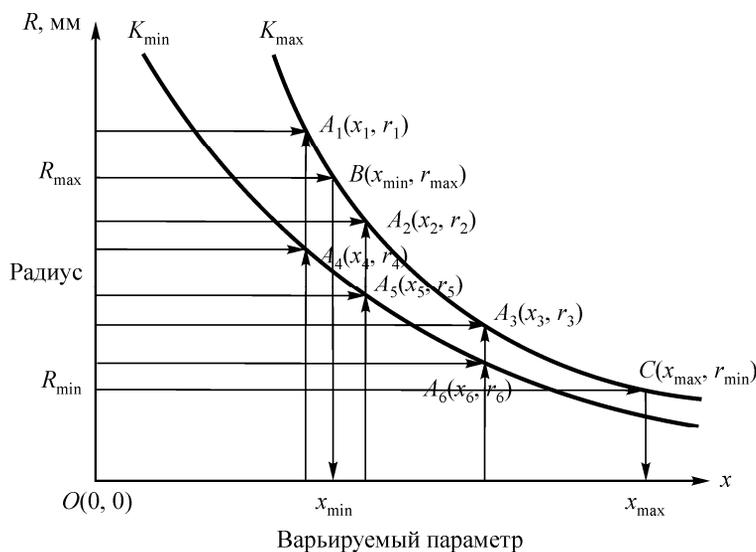


Рис. 2. Принцип определения требуемого диапазона допустимых значений режимного параметра (подачи щеток)

Построение последних выполняется по узловым точкам, полученным при проведении технологических испытаний щеточной установки. Дальнейшее решение поставленной задачи требует представления полученной экспериментальной информации в аналитическом виде [13].

Учитывая то, что каждая из узловых точек может представлять собой среднее значение многократных измерений радиуса кромки при фиксированном значении подачи  $x$  (в том числе и при многократном воспроизведении условий эксперимента), считаем, что проведенные через узловые точки функции воспроизведены в их окрестности (а также всей области значений варьируемого параметра) с достаточной точностью.

В производственных условиях для упрощения процедуры сбора исходных данных расчета при установленном опытным путем нелинейном характере зависимостей высот кромок  $K_{\max}$  и  $K_{\min}$  (см. рис. 2) примем наименьший (второй) порядок искомых аналитических функций при минимальном количестве узловых точек для каждой из них, равном трем [14, 15].

Таким образом, каждая из эмпирических функций  $K_{\min} = f_1(x)$ ,  $K_{\max} = f_2(x)$  вида  $r = c + bx + ax^2$  получена по трем характерным точкам: точки  $A_1(x_1, r_1)$ ,  $A_2(x_2, r_2)$ ,  $A_3(x_3, r_3)$  принадлежат функции  $k_{\max} = f_2(x)$ , точки  $A_4(x_4, r_4)$ ,  $A_5(x_5, r_5)$ ,  $A_6(x_6, r_6)$  – функции  $k_{\min} = f_1(x)$ .

Для определения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  функций  $K_{\max} = f_2(x)$ ,  $K_{\min} = f_1(x)$  необходимо решение следующих систем уравнений:

для функции  $K_{\max} = f_2(x)$ :

$$\begin{cases} r_1 = c_1 + b_1x_1 + a_1x_1^2, \\ r_2 = c_1 + b_1x_2 + a_1x_2^2, \\ r_3 = c_1 + b_1x_3 + a_1x_3^2; \end{cases} \quad (1)$$

для функции  $K_{\min} = f_1(x)$ :

$$\begin{cases} r_4 = c_2 + b_2x_4 + a_2x_4^2, \\ r_5 = c_2 + b_2x_5 + a_2x_5^2, \\ r_6 = c_2 + b_2x_6 + a_2x_6^2. \end{cases} \quad (2)$$

При дальнейшем программном решении систем уравнений (1) и (2) в структуре блока вычислений использована формула Крамера [14]. На базе систем (1) и (2) получаем следующие выражения:

$$A_1 | B_1 = \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & x_1 & x_1^2 & r_1 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & r_2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & r_3 \end{array} \right), \quad (3)$$

$$A_2 | B_2 = \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & x_4 & x_4^2 & r_4 \\ 1 & x_5 & x_5^2 & r_5 \\ 1 & x_6 & x_6^2 & r_6 \end{array} \right), \quad (4)$$

тогда для  $K_{\min} = f_1(x)$

$$c_2 = \frac{\Delta_4}{\Delta}, \quad b_2 = \frac{\Delta_5}{\Delta}, \quad a_2 = \frac{\Delta_6}{\Delta}, \quad (5)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_4 & x_4^2 \\ 1 & x_5 & x_5^2 \\ 1 & x_6 & x_6^2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_4 = \begin{vmatrix} r_4 & x_4 & x_4^2 \\ r_5 & x_5 & x_5^2 \\ r_6 & x_6 & x_6^2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_5 = \begin{vmatrix} 1 & r_4 & x_4^2 \\ 1 & r_5 & x_5^2 \\ 1 & r_6 & x_6^2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_6 = \begin{vmatrix} 1 & x_4 & r_4 \\ 1 & x_5 & r_5 \\ 1 & x_6 & r_6 \end{vmatrix}; \quad (6)$$

соответственно, для  $K_{\max} = f_2(x)$

$$c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad b_1 = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad a_1 = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (7)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} r_1 & x_1 & x_1^2 \\ r_2 & x_2 & x_2^2 \\ r_3 & x_3 & x_3^2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & r_1 & x_1^2 \\ 1 & r_2 & x_2^2 \\ 1 & r_3 & x_3^2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & r_1 \\ 1 & x_2 & r_2 \\ 1 & x_3 & r_3 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Далее вычисляется интервал варьировемого параметра  $[x_{\min}, x_{\max}]$ , который удовлетворяет требуемому интервалу значений радиуса кромки  $[R_{\min}, R_{\max}]$ . В большинстве случаев данный диапазон задан в конструкторской либо нормативной документации на деталь.

Границы искомого интервала – проекции точек  $B$  и  $C$  на ось абсцисс, которые являются пересечением прямых  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  с кривой  $K_{\max} = f_2(x)$ .

Их определяем вычислением наименьших положительных корней следующих уравнений:

точка  $B(x_{\min}, R_{\max})$ :

$$R_{\max} = c_1 + b_1 x_{\min} + a_1 x_{\min}^2, \quad (9)$$

точка  $C(x_{\max}, R_{\min})$ :

$$R_{\min} = c_2 + b_2 x_{\max} + a_1 x_{\max}^2. \quad (10)$$

Решение по вычислению интервала  $[x_{\min}, x_{\max}]$  является корректным в случае, если удовлетворяется следующее условие:

$$x_{\min} \leq x_{\max}. \quad (11)$$

Результат вычисления выражений (9) и (10) в виде граничных значений допустимой подачи щеток  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  выдается пользователю блоком вывода результата. Если условие (11) в результате расчета не удовлетворено, то в соответствующих полях вывода интерфейса пользователя появится сообщение `No_result`.

Важным элементом в работе модуля является возможность как формирования новых, так и выбора пользователем готовых (ранее полученных) функций  $K_{\min} = f_1(x)$ ,  $K_{\max} = f_2(x)$  из базы данных. Это позволит, при наличии соответствующих возможностей щеточной установки, вычислять интервал  $[x_{\min}, x_{\max}]$  для отличающихся по технологическим признакам участков детали индивидуально (рис. 3). Пользователь, при этом, экономит время при вводе исходных данных расчета.

Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.00	3.60	2.68	3.00
Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.12	3.64	2.64	2.96
Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.16	3.69	2.59	2.95
Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.21	3.76	2.52	2.94
Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.32	3.81	2.48	2.90
Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.34	3.85	2.45	2.90
Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.42	3.91	2.41	2.87
Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.44	3.96	2.38	2.87
Kmin	Kmax	Rmin	Rmax	fmin	fmax
5.00	15.00	1.50	4.00	2.36	2.85

Рис. 3. Окно содержимого файла результатов расчета для различных технологических условий финишной обработки

Интерфейс программного модуля представлен на рис. 4.

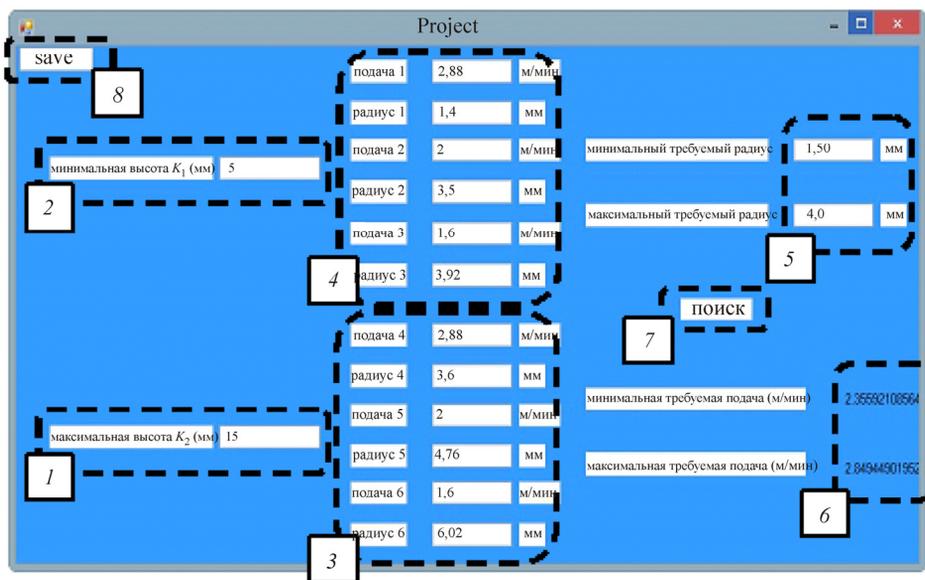


Рис. 4. Интерфейс программного модуля с набором значений параметров расчета

Пользователем должны быть введены: минимальная и максимальная высоты обрабатываемых кромок ( $K_{min}$ ,  $K_{max}$ ) относительно базовой плоскости (поля ввода данных 1 и 2), данные узловых точек (по-

ля ввода данных 3 и 4), диапазон значений радиуса обработанной кромки, который необходимо обеспечить (поле ввода 5). После инициализации всех полей ввода исходных данных запуск расчета выполняется нажатием «кнопки» 7. Результат расчета в виде границ диапазона режимного параметра отображается пользователю в поле 6.

Введенный набор данных полей 3 и 4 для соответствующих значений полей 1 и 2 может быть сохранен в базе модуля для дальнейшего использования нажатием «кнопки» 8. Если пользователем в поля ввода 1 (и/или 2) вводятся значения, для которых ранее выполнена операция сохранения, то поля 3 (и/или 4) инициализируются программой без участия пользователя (автоматически).

### **Экспериментальная проверка полученных результатов**

Наполнение базы данных и последующая апробация программного модуля были выполнены путем проведения технологических испытаний с применением щеточной установки Fladder 400/Gyro (рис. 5). В качестве рабочего инструмента использована абразивная щетка диаметром 300 мм из полосок шлифовальной шкурки шириной 10 мм, зернистостью Р80. Экспериментальная проверка выполнялась на образцах из алюминиевого сплава Д16Т габаритными размерами 600×600×50 мм, имитирующих конструктивные элементы авиационных деталей с подкреплениями (рис. 6, а). Диапазон расстояний между смежными подкреплениями (ребрами жесткости) от 35 до 120 мм.



Рис. 5. Щеточная установка Fladder 400/Gyro

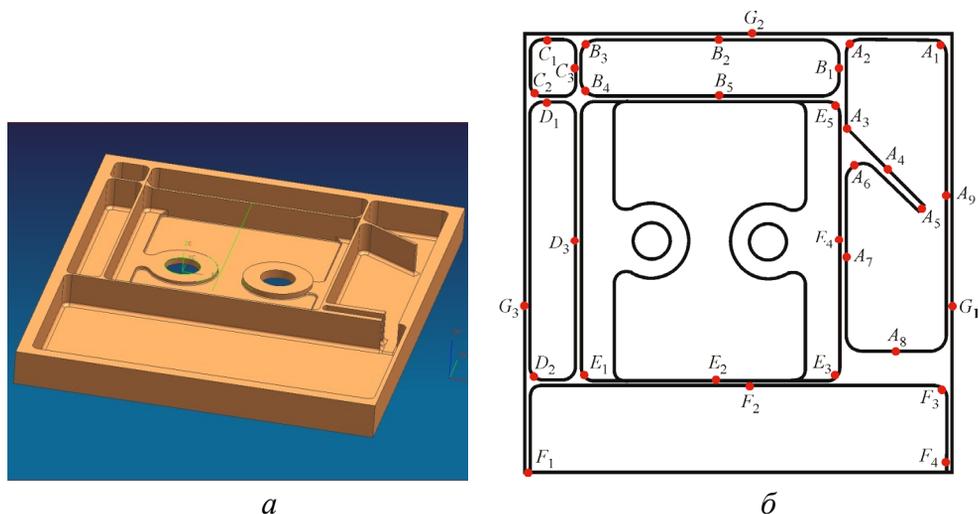


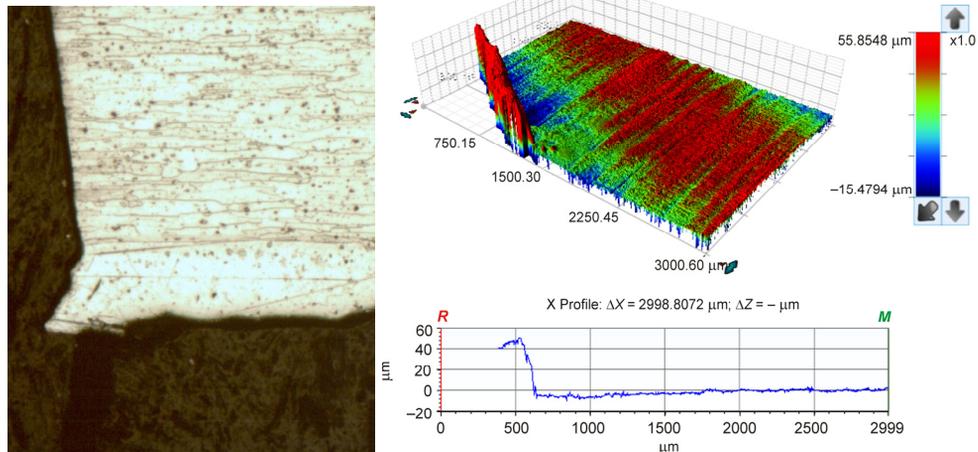
Рис. 6. Тестовый образец (а) и расположение точек контроля радиуса обработанных кромок по завершении обработки (б)

Испытания при постоянной частоте вращения щеток  $n = 300$  об/мин были проведены на шести образцах для трех значений подач стола (1 м/мин; 3 м/мин; 6 м/мин).

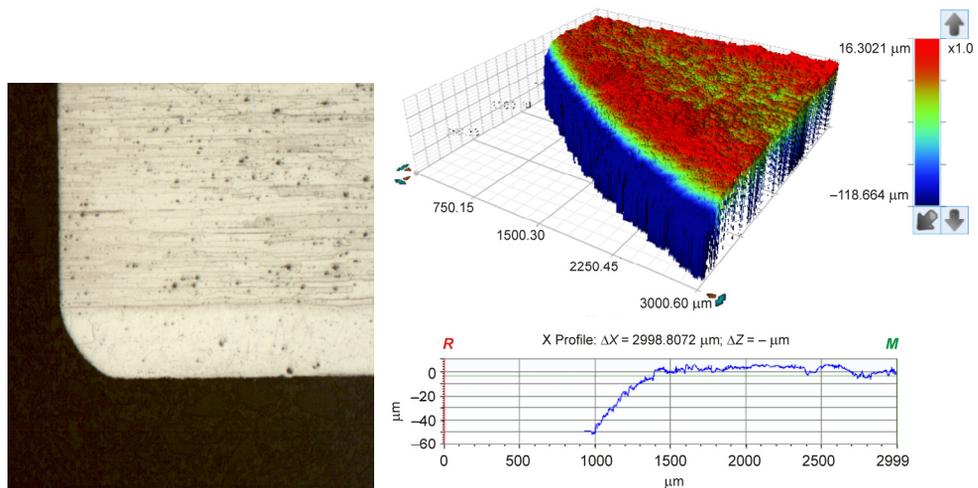
С учетом конструктивных особенностей обрабатываемых образцов (требований к постоянству высоты подкреплений) величины  $K_{\min}$ ,  $K_{\max}$  были заданы двумя значениями осадки ворсин щеток (5 и 35 мм).

Измерение геометрии кромок до и после завершения обработки выполнялось с использованием оптического профилометра компании BRUKER. Область контроля высоты обрабатываемых кромок для каждого образца была разбита на секторы с буквенными обозначениями (рис. 6, б), в каждом из которых результат получен как среднее значение измерений в нескольких точках.

Так, кромки образцов в исходном состоянии характеризовались наличием остаточного заусенца. На рис. 7, а представлено металлографическое изображение заусенца, микропрофиль и типовое объемное изображение области кромки образца до обработки, характеризующееся наличием остаточного заусенца около 0,15 мм. На рис. 7, б аналогично показан типовой результат, достигнутый после обработки. Средние значения результатов измерений радиуса обработанных кромок в пределах соответствующих секторов образца представлены в таблице.



*a*



*б*

Рис. 7. Изображение типичного участка образца с кромкой в исходном состоянии: *a* – до обработки на щеточной установке; *б* – после обработки

Экспериментальные данные, полученные в ходе технологических испытаний на тестовых образцах

Осадка ворсин щеток относительно кромки образца, мм	Величина подачи стола, м/мин																				
	1,0							3,0							6,0						
	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G
5	0,35	0,31	0,34	0,39	0,32	0,37	0,36	0,15	0,12	0,13	0,14	0,16	0,18	0,16	0,05	0,07	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08
35	0,68	0,71	0,69	0,72	0,67	0,73	0,74	0,47	0,49	0,39	0,49	0,50	0,47	0,43	0,18	0,17	0,18	0,16	0,18	0,19	0,17

Таким образом, были получены данные для определения коэффициентов функций  $K_{\min} = f_1(x)$ ,  $K_{\max} = f_2(x)$ . Для принятого диапазона допустимых значений радиуса кромок (от 0,1 до 0,4 мм) с помощью разработанного программного модуля получен расчетный диапазон подач щеточной обработки: от 3,46 до 3,72 м/мин.

Обработка реальной детали типа «лонжерон» (рис. 8), геометрия подкреплений которой характеризуется аналогичным разбросом положений кромок по высоте относительно базовой плоскости (30 мм), выполнена при подаче стола 3,7 м/мин (верхняя граница расчетного диапазона).

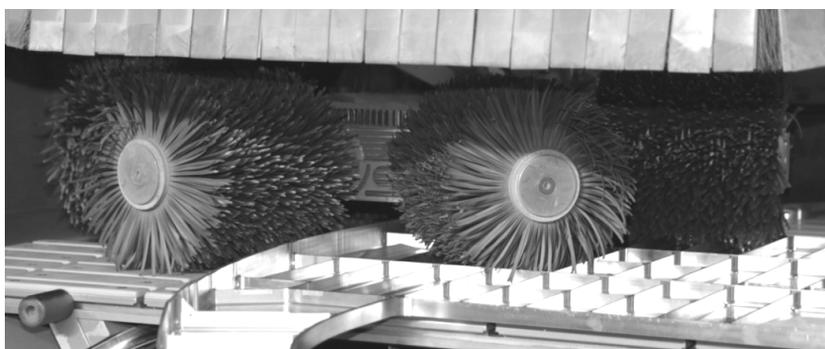


Рис. 8. Процесс финишной обработки детали «лонжерон» с диапазоном высот обрабатываемых кромок относительно базовой плоскости 30 мм

Контроль радиуса кромок после обработки показал, что выбранная подача с применением разработанного программного модуля позволяет обеспечить диапазон значений от 0,1 до 0,3 мм (рис. 9), что удовлетворяет требованиям конструкторской документации.

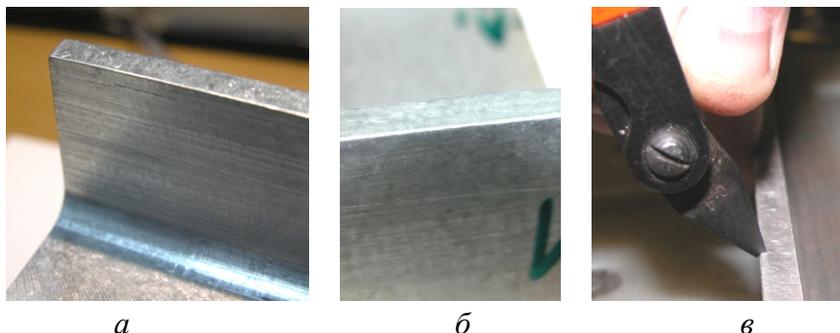


Рис. 9. Кромки участков детали «лонжерон» по завершении обработки (а, б) и контроль радиуса полученной кромки на детали шаблоном (в)

## **Заключение**

Тестовое использование программного модуля при назначении режимов щеточной обработки деталей из алюминиевых сплавов самолета МС-21 в условиях Иркутского авиационного завода позволило снизить долю трудоемкости ручной доводки после щеточной обработки на 16 %, оптимизировать процесс загрузки щеточной установки с учетом обрабатываемой номенклатуры деталей.

*Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации “Иркут” с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.*

## **Список литературы**

1. 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.
2. Чапышев А.П., Иванова А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2014. – Т. 16, № 1–5. – С. 1627–1634.
3. Niknam S.A., Songmene V. Deburring and edge finishing of aluminum alloys: A review // 12th International Conference on Aluminium (INALCO 2013). – Montreal. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/263966600\\_Deburring\\_and\\_edge\\_finishing\\_of\\_aluminum\\_alloys\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/263966600_Deburring_and_edge_finishing_of_aluminum_alloys_A_review) (дата обращения: 12.03.2016).
4. Effects of lubrication modes on part quality during drilling 6061-T6 aluminium alloy / Y. Zedan, V. Songmene, J. Kouam, J. Masoune // Int. J. Machining and Machinability of Materials. – 2013. – Vol. 13, № 2/3. – P. 231–252. – URL: <https://scholar.google.com/citations?>

view\_op=view\_citation&hl=hr&user=2s4k0imJjdkC&citation\_for\_view=2s4k0imJjdkC:zYLM7Y9cAGgC (дата обращения: 12.03.2016).

5. Przyklenk K. Abrasive flow machining a process for surface finishing and deburring of workpiece with a complicated shape by means of an abrasive laden medium // *Advances in Non-traditional Machining*. – 1986. – PED, ASME, 22. – P. 101–110.

6. Dornfeld D. Burr formation, burr minimization and deburring seminar: CRIAQ MANU-409C Automated deburring and part finishing Ecole de technologie superieure (ETS). – 2009. – URL: <http://www.intechopen.com/books/references/light-metal-alloys-applications/machining-burrs-formation-deburring-of-aluminium-alloys> (дата обращения: 12.03.2016).

7. Micro deburring technology using ultrasonic vibration with abrasive / H.Z. Choi, S.W. Lee, Y.J. Choi, G.H. Kim, S.L. Ko; Laboratory for Manufacturing Automation University of California, Berkeley. Research Reports 2003/04 May. – 2004. – P. 37–43. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.110.8373&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 12.03.2016).

8. Mark Fultz D. Abrasive filament brush deburring of powdered metal components. – URL: <http://www.abtex.com/pdf/abfildeb.pdf> (дата обращения: 12.03.2016).

9. Савилов А.В., Пятых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // *Известия Самар. науч. центра РАН*. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 211–217.

10. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details / A.V. Ivanova, A.S. Belomestnykh, E. Semenov, B.B. Ponomarev // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2015. – Т. 7, № 5. – P. 1774–1780.

11. К вопросу обеспечения точности определения интенсивности поверхностного упрочнения / А.Е. Пашков, С.В. Викулова, А.С. Вяткин, А.А. Макарук // *Современные технологии, системный анализ, моделирование* / Иркут. гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2010. – № 1. – С. 102–107.

12. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Козырева М.В. Анализ зависимостей съема и шероховатости поверхности детали при обработке лепестковыми кругами по результатам факторного эксперимента // *Вестник Иркут. гос. техн. ун-та*. – 2015. – № 1(96). – С. 32–41.

13. Чапышев А.П., Бобров А.Н. Повышение эффективности определения режимов виброабразивной обработки в зависимости от технологических условий // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 11. – С. 66–74.

14. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс. – 8-е изд. – М.: Айрис-пресс, 2009. – 608 с.

15. К вопросу сертификации технологии поверхностного упрочнения на соответствие требованиям международных стандартов / А.Е. Пашков, Ю.Н. Иванов, Ю.С. Румянцев, А.А. Макарук // Наука и технологии в промышленности. – 2013. – № 1–2. – С. 104–107.

### **References**

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

2. Chapyshev A.P., Ivanova A.V. Tekhnologicheskie vozmozhnosti protsessov mekhanizirovannoi finishnoi obrabotki detalei s primeneniem avtomaticheskikh statsionarnykh ustanovok [Technological capabilities of processes of the mechanized finishing processing of details with application of automatic stationary installations]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 1-5, pp. 1627-1634.

3. Niknam S.A., Songmene V. Deburring and edge finishing of aluminum alloys: A review. *12th International Conference on Aluminium (INALCO 2013)*. Montreal, available at: [https://www.researchgate.net/publication/263966600\\_Deburring\\_and\\_edge\\_finishing\\_of\\_aluminum\\_alloys\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/263966600_Deburring_and_edge_finishing_of_aluminum_alloys_A_review) (accessed 12 March 2016).

4. Zedan Y., Songmene V., Kouam J., Masounave J. Effects of lubrication modes on part quality during drilling 6061-T6 aluminium alloy. *International Journal Machining and Machinability of Materials*, 2013, vol. 13, no. 2/3, pp. 231-252, available at: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=hr&user=2s4k0imJjdkC&citation\\_for\\_view=2s4k0imJjdkC:zYLM7Y9cAGgC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=hr&user=2s4k0imJjdkC&citation_for_view=2s4k0imJjdkC:zYLM7Y9cAGgC) (accessed 12 March 2016).

5. Przyklenk K. Abrasive flow machining a process for surface finishing and deburring of workpiece with a complicated shape by means of an

abrasive laden medium. *Advances in Non-traditional Machining*, 1986, PED, ASME, no. 22, pp. 101-110.

6. Dornfeld D. Burr formation, burr minimization and deburring seminar: CRIAQ MANU-409C Automated deburring and part finishing Ecole de technologie superieure (ETS), 2009, available at: <http://www.intechopen.com/books/references/light-metal-alloys-applications/machining-burrs-formation-deburring-of-aluminium-alloys> (accessed 12 March 2016).

7. Choi H.Z., Lee S.W., Choi Y.J., Kim G.H., Ko S.L. Micro deburring technology using ultrasonic vibration with abrasive. *Research Reports*, 2003/04, Berkeley: Laboratory for Manufacturing Automation University of California, 2004, May, pp. 37-43, available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.110.8373&rep=rep1&type=pdf> (accessed 12 March 2016).

8. Mark Fultz D. Abrasive filament brush deburring of powdered metal components, available at: <http://www.abtex.com/pdf/abfildeb.pdf> (accessed 12 March 2016).

9. Savilov A.V., Piatykh A.S. Opredelenie koeffitsientov sil rezaniia dlia modelirovaniia protsessov mekhanoobrabotki [Determination of coefficients of forces of cutting for modeling of processes of mechanoprocessing]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 211-217.

10. Ivanova A.V., Belomestnykh A.S., Semenov E., Ponomarev B.B. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details. *International Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 1774-1780.

11. Pashkov A.E., Vikulova S.V., Viatkin A.S., Makaruk A.A. K voprosu obespecheniia tochnosti opredeleniia intensivnosti poverkhnostnogo uprochneniia [To a question of ensuring accuracy of determination of intensity of superficial hardening]. *Sovremennye tekhnologii, sistemnyi analiz, modelirovanie*. Irkutskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia, 2010, no. 1, pp. 102-107.

12. Kol'tsov V.P., Starodubtseva D.A., Kozyreva M.V. Analiz zavisimosti s"ema i sherokhovatosti poverkhnosti detali pri obrabotke lepestkovymi krugami po rezul'tatam faktornogo eksperimenta [The analysis of dependences of a sjem and roughness of a surface of a detail when processing by petal circles by results of factorial experiment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 1(96), pp. 32-41.

13. Chapyshev A.P., Bobrov A.N. Povyshenie effektivnosti opredeleniia rezhimov vibroabrazivnoi obrabotki v zavisimosti ot technologicheckikh uslovii [Increase of efficiency of definition of the modes of vibroabrasive processing depending on technological conditions]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 11, pp. 66-74.

14. Pis'mennyi D.T. Konspekt leksii po vysshei matematike [Abstract of lectures on the higher mathematics]. Moscow: Airis-press, 2009. 608 p.

15. Pashkov A.E., Ivanov Iu.N., Rumiantsev Iu.S., Makaruk A.A. K voprosu sertifikatsii tekhnologii poverkhnostnogo uprochneniia na sootvetstvie trebovaniyam mezhdunarodnykh standartov [To a question of certification of technology of superficial hardening on compliance to requirements of the international standards]. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti*, 2013, no. 1-2, pp. 104-107.

Получено 22.03.2016

### **Об авторах**

**Чапышев Александр Петрович** (Иркутск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств» Иркутского национального исследовательского технического университета; e-mail: chapsh@mail.ru.

**Стародубцева Дарья Александровна** (Иркутск, Россия) – аспирантка кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств» Иркутского национального исследовательского технического университета; e-mail: Starodybseva91@mail.ru.

### **About the authors**

**Aleksandr P. Chapyshev** (Irkutsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology and Engineering of Production Equipment, Irkutsk National Research Polytechnic University; e-mail: chapsh@mail.ru.

**Dar'ia A. Starodubtseva** (Irkutsk, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Technology and Engineering of Production Equipment, Irkutsk National Research Polytechnic University; e-mail: Starodybseva91@mail.ru.