



## Повышение эффективности зачистки поверхностей двойной кривизны на установке с револьверной головкой

© Винь Ле Чи, В.П. Кольцов, Д.А. Стародубцева, В.Б. Ракицкая

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – разработать методику выбора рационального профиля профилированного лепесткового круга для револьверной зачистной головки для зачистки поверхностей детали с различным радиусом поперечной кривизны. Для реализации технологии изготовления крупногабаритных обводообразующих деталей специалистами Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутского авиационного завода была спроектирована и изготовлена специальная установка УДФ-4 (установка дробеударного формообразования). Данная установка оснащена системой ЧПУ и двумя рабочими органами, дробеметным аппаратом и револьверной зачистной головкой с четырьмя лепестковыми кругами. В работе предложена методика и критерии выбора профилированного лепесткового круга для зачистки обводообразующих поверхностей деталей в зависимости от радиуса кривизны последней. Для анализа был выбран лепестковый круг с оптимальным радиусом кривизны профиля 40 м, позволяющий охватить достаточно большой диапазон кривизны профиля обрабатываемых деталей (от 8 до 40 м). Установлено, что профилированные лепестковые круги шириной 100 и 200 м с радиусом профиля лепестков 40 м обеспечивают равномерный сьем материала при зачистке поверхности с радиусом кривизны от 8 до 40 м без последующего перекрытия обработанной полосы. Показано, что для повышения производительности зачистки необходимо применение более широких профилированных лепестковых кругов. В этом случае круг шириной 300 мм можно применять для участков поверхности детали с радиусом поперечной кривизны более 14 м, а круг шириной 400 мм – для участков поверхности с радиусом кривизны более 20 м. Таким образом, по результатам сравнения процесса зачистки криволинейной поверхности лепестковыми кругами прямого профиля установлено, что профилированные лепестковые круги значительно расширяют возможности использования револьверной зачистной головки установки УДФ-4.

**Ключевые слова:** дробеударное формообразование, зачистка, лепестковый круг, профилирование лепестковых кругов, математическая модель

**Для цитирования:** Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Ракицкая В.Б. Повышение эффективности зачистки поверхностей двойной кривизны на установке с револьверной головкой. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 300–308. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-300-308>

## Improving stripping efficiency of double curvature surface on a setup with turret head

Vinh Le Tri, Vladimir P. Koltsov, Darya A. Starodubtseva, Valentina B. Rakitskaya

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The study was performed to develop a method for selecting a rational profile of a profiled flap wheel for a turret stripping head for cleaning parts with different radius of the transverse curvature. Researchers from the Irkutsk National Research Technical University and Irkutsk Aviation Plant designed and fabricated a special PFS-4 (peen forming setup) unit to implement manufacturing technology of large-scale contour-forming components. The unit is equipped with a CNC system, two movable operating elements, a shot blaster and a turret stripping head with four flap wheels. The paper offers methods and criteria for selecting the profiled flap wheel for stripping the contour-forming surfaces of the components, depending on the curvature radius of the latter. A flap wheel with an optimal curvature radius of 40 m was chosen for analysis, which allows a sufficiently large range of profile curvature of the processed components (from 8 to 40 m) to be covered. Profiled flap wheels 100 and 200 m wide with a flap profile radius of 40 m provided uniform material removal when cleaning the surface with a curvature radius from 8 to 40 m without further overlapping with a finished strip. It was shown that wider profiled flap wheels are necessary to increase stripping efficiency. In this case, a 300 mm wide flap wheel can be used for a component surface area with a transverse curvature radius over 14 m and a 400 mm wheel for surface areas with a curvature radius of over 20 m. Thus, comparing the stripping process of a curved surface by the straight flap wheel revealed that

profiled flap wheels significantly expand the workability of the PFS-4 unit turret stripping head.

**Keywords:** peen forming setup, grinding, flap wheel, profiled flap wheel, mathematical model

**For citation:** Le Tri Vinh, Koltsov VP, Starodubtseva DA, Rakitskaya VB. Improving stripping efficiency of double curvature surface on a setup with turret head. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):300–308. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-300-308>

## ВВЕДЕНИЕ

Для получения сложных криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок, а также операций упрочнения широко применяется дробеударное формообразование и дробеударное упрочнение [1]. Зачистка абразивным лепестковым кругом после дробеударного формообразования является обязательной частью технологического процесса формообразования крупногабаритных обводообразующих поверхностей панелей и обшивок. При выполнении зачистки происходит удаление тонкого слоя материала с целью улучшения параметров шероховатости поверхности, полученной после выполнения дробеударного формообразования [1–6]. Для реализации технологии формообразования крупногабаритных обводообразующих поверхностей панелей и обшивок в рамках выполнения совместных работ сотрудниками Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутско-

го авиационного завода была разработана и эффективно применяется установка с ЧПУ УДФ-4 [2].

Для повышения производительности и гибкости процесса зачистки криволинейных поверхностей панелей и обшивок для УДФ-4 изготовлена и успешно используется револьверная зачистная головка с четырьмя лепестковыми кругами шириной 100-200-300-400 мм, соответственно [7–10]. При этом обрабатываемая поверхность разбивается на полосы обработки, ширина которых зависит от кривизны поверхности и выбора лепесткового круга, его ширины и профиля. Для поддержания постоянной величины деформации лепестков во время контакта с обрабатываемой поверхностью револьверная зачистная головка (рис. 1) имеет возможность поворота относительно горизонтальной оси по направлению подачи. Эта возможность реализуется системой управления позиционированием круга относительно поверхности.



Рис. 1. Револьверная зачистная головка для зачистки криволинейных панелей самолета на установке УДФ-4:  
1 – зачистная головка; 2 – лепестковые круги; 3 – двигатель главного движения; 4 – пульт управления

Fig. 1. Turret for grinding curved aircraft panels on the UDF-4 machine-tool:  
1 – grinding head; 2 – flap wheels; 3 – main motion motor; 4 – control board



При использовании лепестковых кругов цилиндрической формы для зачистки криволинейных поверхностей деформация лепестков по длине круга будет различной, с наибольшей величиной в центре круга и уменьшением по краям. Вследствие этого, воздействие абразивных зерен лепестков на поверхности пятна контакта будет различным, что, в свою очередь, приводит к неравномерному съему металла по ширине обработки. Поэтому для обеспечения равномерного съема на обрабатываемой поверхности выполняют рабочие проходы с перекрытием уже обработанной полосы с небольшим съемом, что приводит к увеличению времени обработки [11–21].

Кроме того, при зачистке с перекрытием полос достаточно сложно обеспечить равномерность съема материала на протяженности всей детали, поскольку из-за переменного радиуса поперечной кривизны по длине обрабатываемой поверхности трудно определить рациональную ширину перекрытия при каждом последующем проходе зачистки.

### ЗАЧИСТКА ПРИОФИЛИРОВАННЫМ ЛЕПЕСТКОВЫМ КРУГОМ

Равномерность съема при зачистке на установке с револьверной головкой с большим успехом обеспечивает использование профилированных лепестковых кругов, радиус поперечной кривизны которых близок к радиусу кривизны обрабатываемой поверхности. При этом отпадает необходимость перекрытия следов предыдущих проходов, что, в свою очередь, повышает производительность обработки.

На рис. 2 представлена схема зачистки с помощью профилированного лепесткового круга обрабатываемой поверхности с радиусом поперечной кривизны  $R_p$ .

Из рис. 2 видно, что при вдавливании лепесткового круга в поверхность детали на величину  $T$  (величина осадки круга) лепестки изгибаются по поверхности контакта на одинаковую величину. Учитывая то, что радиус применяемого круга (175 мм) существенно превышает величину осадки (4–5 мм), лепестки по ширине контакта с поверхностью детали воздействуют на поверхность детали

равномерно, обеспечивая равномерность съема материала с обрабатываемой поверхности.

### ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ПРОФИЛИРОВАННОГО ЛЕПЕСТКОВОГО КРУГА ДЛЯ ЗАЧИСТКИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При зачистке поверхностей переменной кривизны лепестковым кругом необходимо выбрать радиус кривизны профиля круга равным максимальному радиусу поперечной кривизны детали. Однако при уменьшении кривизны детали образуется зазор (показан зазор  $a$  на рис. 2 *b*). Очевидно, что при сравнительно небольшом значении  $a$ , в зависимости от требований к точности контура поверхности (например, менее 0,5 мм), высокая равномерность съема материала еще обеспечивается, при увеличении  $a$  более 0,5 мм необходимо выбрать уже другой круг – с меньшим радиусом кривизны.

На рис. 3 представлена схема для расчета зазора, образованного разницей значений радиуса поперечной кривизны и радиуса кривизны профиля круга. Зазор  $a$  в данном случае представляется как максимальное расстояние от крайней точки  $A$  лепестка круга 1 до обрабатываемой поверхности детали 2 (до точки  $G$ ). Очевидно, что зазор  $a$  зависит от радиуса кривизны профиля лепесткового круга  $R_f$ , радиуса кривизны поверхности детали  $R_p$  на данном участке и ширины круга,  $B$ .

Из рис. 3 следует, что

$$a = DH = CH - CD. \quad (1)$$

При этом:

$$CH = CP - HP = CP - \sqrt{GP^2 - GH^2} = R_p - \sqrt{R_p^2 - \frac{B^2}{4}}. \quad (2)$$

Аналогично:

$$CD = CF - DF = CF - \sqrt{AF^2 - AD^2} = R_f - \sqrt{R_f^2 - \frac{B^2}{4}}. \quad (3)$$

Таким образом, максимальный зазор  $a$  графически определяется следующим образом:

$$a = Rp - Rf - \sqrt{Rp^2 - \frac{B^2}{4}} + \sqrt{Rf^2 - \frac{B^2}{4}}. \quad (4)$$

На рис. 4 представлены результаты расчетов в виде графиков зависимости зазора  $a$ ,

рассчитанного по (4), при различном значении радиуса поперечной кривизны обрабатываемой поверхности детали (от 8 до 40 м) при применении четырех различных по ширине лепестковых кругов 100-200-300-400 мм с радиусом кривизны профиля лепесткового круга 40 м.

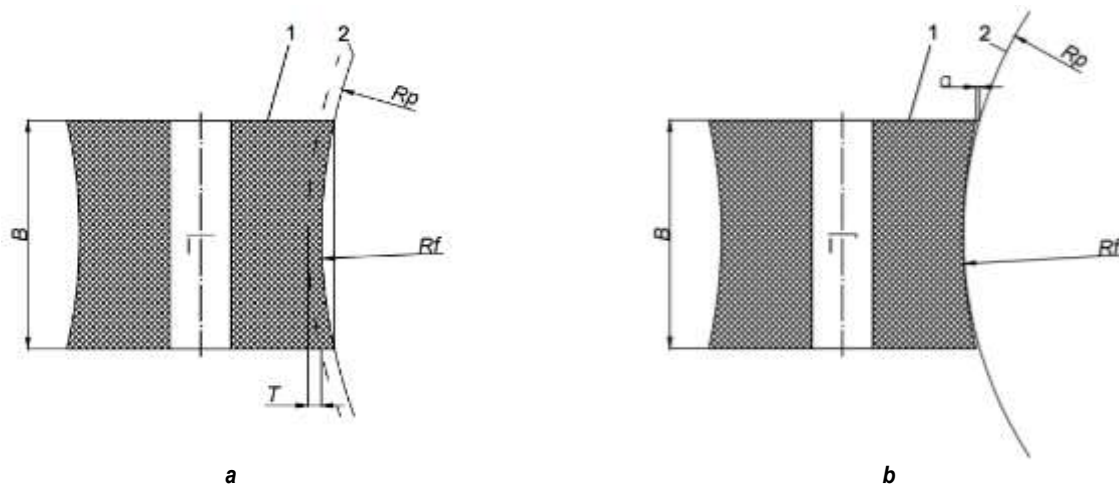


Рис. 2. Зачистка профилированным лепестковым кругом, где 1 – профилированный круг; 2 – обрабатываемая поверхность с радиусом поперечной кривизны  $R_p$ ; а – при одинаковом радиусе кривизны профиля круга и обрабатываемой поверхности; б – при разном радиусе кривизны профиля круга и обрабатываемой поверхности

Fig. 2. Grinding by a profiled flap wheel, where 1 – profiled flap wheel; 2 – machined surface with the transverse curvature radius  $R_p$ ; а – under the same curvature radius of the flap wheel profile and machined surface; б – under the different curvature radius of the flap wheel profile and machined surface

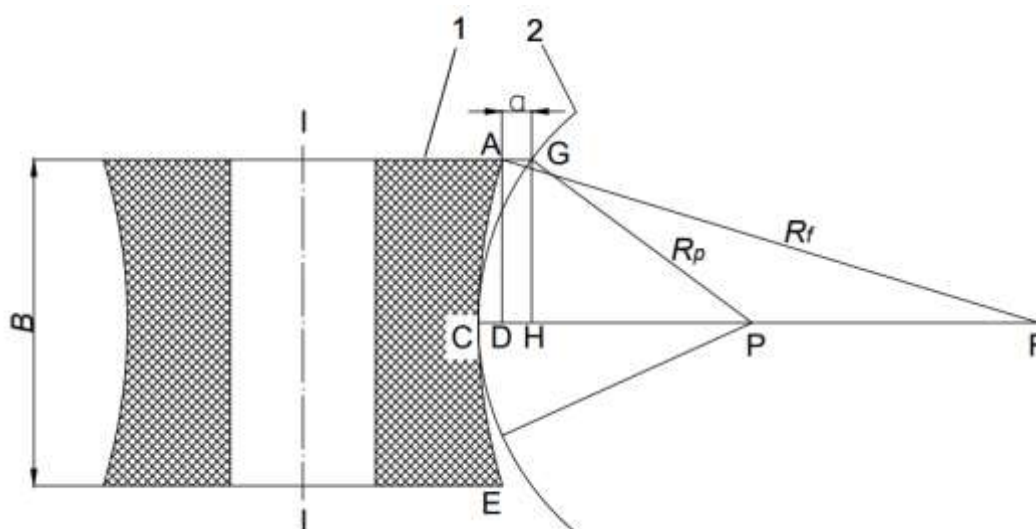


Рис. 3. Схема для расчетов зазора  $a$  при зачистке поверхности детали с радиусом поперечной кривизны меньше радиуса кривизны профиля лепесткового круга, где 1 – профилированный лепестковый круг; 2 – обрабатываемая поверхность; А – максимальный зазор; В – ширина лепесткового круга;  $R_f$  – радиус профиля лепесткового круга;  $R_p$  – радиус кривизны детали

Fig. 3. Diagram for calculating gap  $a$  during grinding the surface of a part, whose transverse curvature radius is smaller than the curvature radius of the flap wheel profile, where 1 – profiled flap wheel; 2 – machined surface; А – maximum gap; В – flap wheel width;  $R_f$  – radius of the flap wheel profile;  $R_p$  – radius of the part curvature



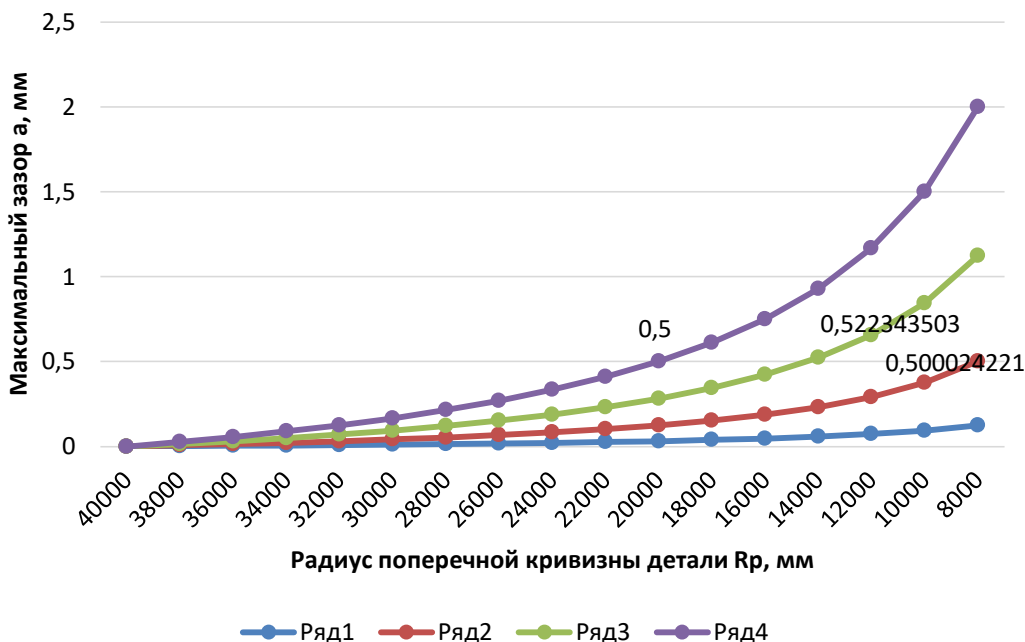


Рис. 4. Зависимость зазора  $a$  от ширины лепесткового круга с радиусом профиля 40 м и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности детали, где ряд 1 – круг шириной 100 мм; ряд 2 – круг шириной 200 мм; ряд 3 – круг шириной 300 мм; ряд 4 – для круга шириной 400 мм

Fig. 4. Dependence of the gap  $a$  on the width of the flap wheel with a profile radius of 40 m and the curvature radius of the machined part surface, where row 1 – 100 mm wide flap wheel; row 2 – 200 mm wide flap wheel; row 3 – 300 mm wide flap wheel; row 4 – 400 mm wide flap wheel

Результаты расчетов (см. рис. 4) показали, что при допускаемом значении зазора  $a$  в пределах до 0,5 мм (как предельное значение, по которому еще обеспечивается равномерный съем материала) лепестковые круги шириной 100 и 200 мм с радиусом профиля лепестков 40 м могут применяться для зачистки поверхности с радиусом кривизны от 8 до 40 м без перекрытия полосы обработки. Однако для повышения производительности зачистки необходимо применение более широких профилированных лепестковых кругов, в данном случае круг шириной 300 мм можно применять для участков поверхности детали с радиусом поперечной кривизны более 14 м, а круг шириной 400 мм для участков поверхности с радиусом кривизны более 20 м.

Таким образом, по результатам сравнения процесса зачистки криволинейной поверхности лепестковыми кругами прямого профиля [22–28], профилированные лепестковые круги значительно расширяют возможности использования зачистной головки револьверной установки УДФ-4М в плане увеличения диапазоны радиуса кривизны по-

верхности детали при зачистке с более широкими кругами, что значительно сокращает время обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При зачистке сложных криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок предложение по применению профилированного лепесткового круга является весьма перспективным решением для получения максимально возможного равномерного съема материала с поверхности обрабатываемой детали.

Представленная в данной работе методика расчета величины зазора, образованного между профилем лепестков круга и обрабатываемой поверхностью деталей, позволяет определить наиболее рациональный профилированный лепестковый круг для зачистной головки револьверной для поверхностей детали с различным радиусом поперечной кривизны, обеспечивающий повышение производительности обработки и более равномерный съем материала с поверхности детали.

### Список литературы

1. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Автоматизация процесса финишной обработки после дробеударного формообразования // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред. Ю.В. Димова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 28–31.
2. Пашков А.Е., Лихачев А.А., Викулова С.В. К вопросу комплексной автоматизации процесса формообразования длинномерных листовых деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 4–3. С. 21–24.
3. Пашков А.Е. О создании комплексной технологии формообразования крупногабаритных панелей // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов: материалы Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. семинара (г. Иркутск, 9–11 ноября 2011 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. С. 103–110.
4. 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 Иркутского государственного технического университета. 2015. № 1. С. 32–41.
5. Koltsov V., Starodubtseva D., Le Tri Vinh, Phung Xuan Son. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels // Aviaengineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference (Irkutsk, 21–26 May 2018). Irkutsk, 2018. Vol. 158. P. 386–390. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.75>
6. Дубровский П.В. Исследование процессов полирования авиационных деталей // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: тезисы докладов V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Ульяновск, 24–25 ноября 2016 г.). Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2016. С. 141–142.
7. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2005. 138 с.
8. Димов Ю.В. Перспективы использования лепестковых кругов при изготовлении деталей самолета // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред. Ю.В. Димова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 3–10.
9. Стародубцева Д.А. Револьверная головка для зачистки панелей и обшивок лепестковыми кругами после дробеударного формообразования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4. С. 34–37.
10. Пат. № 2567926, Российская Федерация, В24В 29/00 (2006.01), В24В 41/04 (2006.01). Револьверная головка для шлифования криволинейных поверхностей лепестковыми кругами / А.К. Китов, А.Е. Пашков, П.Г. Гришаев, Д.А. Стародубцева; заявители и патентообладатели Иркутский национальный исследовательский технический университет, ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут». Заявл. 27.12.2013; опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31.
11. Kalchenko V.I., Slidenikova O.S., Kalchenko D.V., Muzychka D.G. 3D-моделивання інструментів та формоутворення при шліфуванні торців непереточуваних прямокутних пластин орієнтованим кругом // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2014. № 2. Р. 55–62.
12. Кальченко В.И., Следникова О.С., Кальченко Д.В. 3D-моделирование инструментов, процессу зняття припуску та формоутворення під час шліфування зі схрещеними осями торової поверхні і круга // Технічні науки та технології. 2015. № 2. Р. 31–38.
13. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Веремей Г.А., Следникова Е.С. Модульное 3D-моделирование инструментов, процесса съема припуска и формообразования при растачивании седел клапанов ориентированной пластинкой // В і с н и к Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2015. № 2. С. 51–60.
14. Следников О. Модульне моделювання профілів кругів, зняття припуску та формоутворення при двосторонньому шліфуванні торців некруглих деталей // Технічні науки та технології. 2016. № 3. Р. 76–84.
15. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Кологойда А.В., Кириенко С.Ю. Шлифование криволинейных поверхностей лопаток газотурбинных двигателей абразивной лентой при помощи робота с ЧПУ РМ-01 // Вестник двигателестроения. 2012. № 1. С. 181–185.
16. Воскобойников Б.С., Гречиков М.М., Гуськова Г.И. Шлифовальные технологии и высокоточное оборудование // Комплект: инструмент, технология, оборудование. 2008. № 1. С. 12–30.
17. Николаенко А.А. Повышение производительности и точности обработки при профильном глубинном шлифовании // Вестник машиностроения. 1997. № 2. С. 21–23.
18. Носенко В.А., Жуков В.К., Васильев А.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование поверхности неполного цикла с периодической правкой круга // Вестник машиностроения. 2008. № 5. С. 44–50.
19. Рыкунов Н.С., Сухов Е.И., Волков Д.И. Высокопроизводительная обработка материалов методом глубинного шлифования // Оптимизация операций механической обработки: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. С.С. Силина. Ярославль: Изд-во ЯПИ, 1984. С. 23–32.
20. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
21. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Фунг Суан Шон. Производительность зачистки поверхности лепестковым кругом после дробеударного формообразования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 874–883. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883>
22. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Чапышев А.П. К определению величины припуска при зачистке поверхности панелей и обшивок лепестковым кругом



после дробеударного формообразования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 25–30.

23. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction // International Journal of Computer Applications in Technology. 2001. Vol. 14. Iss. 1-3. P. 51–63.

<https://doi.org/10.1504/IJCAT.2001.000260>

24. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P., et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 319. P. 200–212. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>

25. Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model // International Journal of Impact En-

gineering. 2002. Vol. 27. Iss. 2. P. 119–134. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00043-4)

26. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening // Advances in Engineering Software. 2009. Vol. 40. Iss. 10. P. 1023–1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>

27. Hong T., Ooi J.Y., Shaw B. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses // Engineering Failure Analysis. 2008. Vol. 15. Iss. 8. P. 1097–1110.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.017>

28. Nougier-Lehon C., Zarwel M., Diviani C., Hertz D., Zahouani H., Hoc T. Surface impact analysis in shot peening process // Wear. 2013. Vol. 302. Iss. 1-2. P. 1058–1063. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.031>

## References

1. Pashkov AE, Chapyshev AP. Automation of the finishing process after shot peening shaping. In: Dimov YuV (eds.). *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii = Improving efficiency of technological processes in mechanical engineering*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000, p. 28–31. (In Russ.)

2. Pashkov AE, Likhachev AA, Vikulova SV. To complex automation of long-size sheet part shaping. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2006;4–3: 21–24. (In Russ.)

3. Pashkov AE. On creation of an integrated technology for large panel shaping. In: *Vysokoeffektivnye tekhnologii proektirovaniya, konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki i izgotovleniya samoletov: materialy Vserossiyskogo (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskogo seminar = Highly effective technologies for aircraft design, engineering - technological preparation and manufacture: materials of All-Russian (with international participation) scientific and practical seminar*. 9–11 November 2011, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2011, p. 103–110. (In Russ.)

4. Koltsov VP, Starodubtseva DA, Kozyreva MV. Analysis of cuttings and part surface roughness dependences under flap wheel machining according to factorial experiment results. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;1:32–41. (In Russ.)

5. Koltsov V, Starodubtseva D, Le Tri Vinh, Phung Xuan Son. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels. In: *Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference*. 21–26 May 2018, Irkutsk. Irkutsk; 2018, vol. 158, p. 386–390. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.75> (In Russ.)

6. Dubrovskij PV. Study of aircraft part polishing processes. In: *Sistemy upravleniya zhiznennym ciklom izdelij aviacionnoy tekhniki: aktual'nye problemy, issledovaniya, opyt vnedreniya i perspektivy razvitiya: doklady V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii = Aviation engineering product life cycle control systems: actual*

*problems, research, implementation experience and development prospects: abstracts of V International scientific and practical conference*. 24–25 November 2016, Ul'yanovsk. Ul'yanovsk: Ulyanovsk State University; 2016, p. 141–142. (In Russ.)

7. Pashkov AE. *Technological connections under long sheet metal part manufacturing*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2005, 138 p. (In Russ.)

8. Dimov YuV. Application prospects of flap wheels in aircraft parts manufacturing. In: Dimov YuV (eds.). *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii = Improving efficiency of technological processes in mechanical engineering*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000, p. 3–10. (In Russ.)

9. Starodubtseva DA. A turret for grinding of panels and covers by flap wheel after shot peen forming. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. = Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2015;4:34–37. (In Russ.)

10. Kitov AK, Pashkov AE, Grishaev PG, Starodubtseva DA. A turret for grinding curved surfaces with flap wheels. Patent RF, no. 2567926; 2015. (In Russ.)

11. Kalchenko VI, Sliednikova OS, Kalchenko DV, Muzychka DG. 3d-modeling of tools and forming under while grinding faces of indexable rectangular plates in oriented wheel. *Visnik Chernigivskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki = Visnyk of Chernihiv State Technological University*. 2014;2:55–62. (In Russ.)

12. Kalchenko VI, Sliednikova OS, Kalchenko DV. 3D-modeling of tool, the process of removal of allowance and formation in grinding with crossed axes of torus surface and wheels. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii = Engineering Sciences and Technologies*. 2015;2:31–38. (In Russ.)

13. Kalchenko VI, Kalchenko VV, Veremey GA, Slednikova ES. Modular 3D-modeling of tools, allowance removal and formation when boring valve seats by an oriented plate. *V i s n i k Chernigivskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki = Visnyk of Chernihiv State Technological University*. 2015;2:51–60. (In Russ.)

14. Slidenkova ES. Modular modeling of wheels' profiles, stock removal and formation with bilateral grinding of ends of non-circular details. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii = Engineering Sciences and Technologies*. 2016;3:76–84. (In Russ.)
15. Kalchenko VI, Kalchenko VV, Kologoida AV, Kiriienko SYu. Grinding formed surface blade gas-turbine engine abrasive belt by the instrumentality NC ROBOT PM-01. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2012;1:181–185. (In Russ.)
16. Voskoboinikov BS, Grechikov MM, Guskova GI. Grinding technologies and high-precision equipment. *Komplekt: instrument, tekhnologiya, oborudovanie = Complect: Tool, Technology, Equipment*. 2008;1:12–30. (In Russ.)
17. Nikolaenko AA. Improving productivity and machining accuracy under profile deep grinding. *Vestnik mashinostroeniya*. 1997;2:21–23. (In Russ.)
18. Nosenko VA, Zhukov VK, Vasiliev AA, Nosenko SV. Deep grinding of incomplete-cycle surfaces, with periodic straightening of the wheel. *Vestnik mashinostroeniya*. 2008;5:44–50. (In Russ.)
19. Rykunov NS, Sukhov EI, Volkov DI. High-performance processing of materials by deep grinding method. In: Silin SS (eds.). *Optimizaciya operacij mekhanicheskoy obrabotki = Optimization of machining operations: interuniversity collection of scientific articles*. Yaroslavl: Yaroslavl Polytechnic Institute; 1984, p. 23–32. (In Russ.)
20. Starkov VK. *Grinding with highly porous wheels*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 688 p. (In Russ.)
21. Le Tri Vinh, Koltsov VP, Starodubtseva DA, Phung Xuan Son. Productivity of flap wheel grinding after shot peening. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(5):874–883. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883> (In Russ.)
22. Koltsov VP, Starodubtseva DA, Chapyshev AP. To determination of the value of the allowance during deburring abrasive mop panel surface after shot peen forming. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni A.N. Tupoleva*. 2017;73(1):25–30. (In Russ.)
23. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2001;14:1-3:51–63. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2001.000260>
24. Tu Fubin, Delbergue D, Miao Hongyan, Klotz T, Brochu M, Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation. *Surface and Coatings Technology*. 2017;319:200–212. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>
25. Meguid SA, Shagal G, Stranart JC. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model. *International Journal of Impact Engineering*. 2002;27(2):119–134. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00043-4)
26. Miao HY, Larose S, Perron C, Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(10):1023–1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
27. Hong T, Ooi JY, Shaw B. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses. *Engineering Failure Analysis*. 2008;15(8):1097–1110. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.017>
28. Nougier-Lehon C, Zarwel M, Diviani C, Hertz D, Zahouani H, Hoc T. Surface impact analysis in shot peening process. *Wear*. 2013;302(1-2):1058–1063. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.031>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Ле Чи Винь,

кандидат технических наук,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: vinh\_istu@mail.ru

### Кольцов Владимир Петрович,

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: kolcov@istu.edu

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Vinh Le Tri,

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Mechanical  
Engineering Production Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: vinh\_istu@mail.ru

### Vladimir P. Koltsov,

Dr. Sci. (Eng.),  
Professor of the Department of Mechanical Engineering  
Production Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: kolcov@istu.edu





**Стародубцева Дарья Александровна,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: d.star-irk@yandex.ru

**Darya A. Starodubtseva,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Mechanical  
Engineering Production Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: d.star-irk@yandex.ru

**Ракицкая Валентина Борисовна,**

старший преподаватель кафедры технологии  
и оборудования машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: rvb@istu.edu

**Valentina B. Rakitskaya,**

Senior Lecturer of the Department of Mechanical  
Engineering Production Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: rvb@istu.edu

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-  
ку публикации.

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный  
вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all  
the co-authors.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена  
после рецензирования 16.04.2021; принята к публика-  
ции 30.06.2021.

**Information about the article**

The article was submitted 10.03.2021; approved after  
reviewing 16.04.2021; accepted for publication  
30.06.2021.