

Экспериментальное исследование шероховатости поверхности детали при попутном и встречном направлении подачи при зачистке лепестковым кругом

Ле Чи Винь^{1a}, В.П. Кольцов^{1b}, Д.А. Стародубцева^{1c}, Е.В. Тардыбаева^{2d}

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

² Байкальский государственный университет, Иркутск, ул. Ленина, 11, Россия

^a lechivin@istu.edu, ^b kolcov@istu.edu, ^c starodybseva@ex.istu.edu, ^d zheniakanhsinh@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0680-9009>, ^b <https://orcid.org/0009-0004-7091-5166>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-9953-1888>, ^d <https://orcid.org/0009-0003-3679-5861>

Статья поступила 10.02.2025, принята 06.03.2025

Цель работы – исследование шероховатости плоской поверхности пластины из алюминиевого сплава В95Т1 при попутной и встречной зачистке лепестковым кругом при режимах обработки, применяемых при изготовлении обводообразующих деталей из алюминиевых сплавов. Зачистка образца – пластины из алюминиевого сплава В95Т1 – цилиндрическим абразивным лепестковым кругом диаметром 350 мм шириной 100 мм зернистостью Р60 выполнена с использованием лабораторной зачистной установки, спроектированной и изготовленной в Иркутском национальном исследовательском техническом университете на базе токарно-винторезного станка 1К62. Исследование проведено методом многофакторного эксперимента с тремя переменными, включая частоту вращения лепесткового круга, подачу заготовки (попутное и встречное направление движения заготовки относительно движения лепесткового круга) и осадку лепестков; на двух уровнях варьирования факторов (режимах обработки). По результатам обработки данных эксперимента построены математические модели отклонения среднего арифметического профиля шероховатости поверхности Ra при попутном и встречном направлениях зачистки в зависимости от режимов обработки при уровне доверительной достоверности 0,95. Установлено, что независимо от параметров режима зачистки шероховатость обработанной поверхности пластины Ra не превышает 2,03 мкм. При этом шероховатость обрабатываемой поверхности образца пропорционально зависит от частоты вращения лепесткового круга и значения осадки лепестков. Необходимо отметить, что величина встречного направления подачи заготовки оказывает влияние на шероховатость обработанной поверхности пластины, а при попутном направлении зачистки такое влияние не наблюдается. Полученные математические модели шероховатости обрабатываемой поверхности пластины из алюминиевого сплава В95Т1 лепестковым кругом диаметром 350 мм, шириной 100 мм и зернистостью Р60 позволяют назначить режим зачистки с учетом требований к качеству обрабатываемой поверхности и обеспечением равномерности съема, что весьма важно при обработке поверхности крупноабаритных поверхностей панелей и обшивок.

Ключевые слова: зачистная установка; зачистка лепестковым кругом; В95Т1; режимы обработки; шероховатость зачистки; математическая модель; факторный эксперимент.

Experimental study of the roughness of the surface of the part in the passing and counter feed direction when grinding with a flap wheel

Le Chi Vin^{1a}, V.P. Koltsov^{1b}, D.A. Starodubtseva^{1c}, E.V. Tardybaeva^{2d}

¹ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

² Baikal State University; 11, Lenin St., Irkutsk, Russia

^a lechivin@istu.edu, ^b kolcov@istu.edu, ^c starodybseva@ex.istu.edu, ^d zheniakanhsinh@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0680-9009>, ^b <https://orcid.org/0009-0004-7091-5166>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-9953-1888>, ^d <https://orcid.org/0009-0003-3679-5861>

Received 10.02.2025, accepted 06.03.2025

The aim is to study the roughness of the flat surface of a plate made of aluminum alloy В95Т1 during passing and counter grinding with a flap wheel under processing modes used in the manufacture of contour-forming components made of aluminum alloys. The grinding of the sample, a plate made of aluminum alloy В95Т1 with a cylindrical abrasive flap wheel with a diameter of 350 mm and a width of 100 mm with a grain size of P60, is performed using a laboratory grinding unit designed and manufactured in INRTU on the basis of a turning and screw-cutting machine 1К62. The study is carried out by a multifactorial experiment with three variables, including the rotation frequency of the flap wheel, the feed of the workpiece (the passing and counter direction of movement of the workpiece relative to the movement of the flap wheel) and the precipitation of the petals; at two levels of variation of factors (processing modes). Based on the results of experimental data processing, mathematical models of the deviation of the arithmetic mean profile of surface roughness, Ra, in the passing and opposite direction of grinding, depending on the processing conditions, are constructed with a confidence level of 0.95. It has been found that regardless of the parameters of the grinding mode, the roughness of the treated surface of the plate, Ra, does not exceed 2.03 microns. At the same time, the roughness of the treated surface of the sample proportionally depends on the fre-

quency of rotation of the flap wheel and the value of the precipitation of the petals. It should be noted that the magnitude of the counter feed direction of the workpiece has an effect on the roughness of the treated surface of the plate, and with the passing direction of grinding, such an effect is not observed. The obtained mathematical models of the roughness of the treated surface of the plate made of aluminum alloy B95T1 with a flap wheel with a diameter of 350 mm, a width of 100 mm and a grain size of P60 allow one to assign a grinding mode taking into account the requirements for the quality of the treated surface, and ensuring uniformity of removal, which is very important when processing the surface of large-sized surfaces of panels and sheaths.

Keywords: grinding plant, grinding with a flap wheel, B95T1, processing modes, roughness of grinding, mathematical model, factor experiment.

Введение. Для изготовления крупногабаритных длинномерных панелей и обшивок крыла самолета в настоящее время активно применяется комплексная технология формообразования с помощью дробеударной обработки и последующей зачистки лепестковым кругом [1–21]. Для реализации этой технологии совместно Иркутским национальным исследовательским техническим университетом (ИРНИТУ) и Иркутским авиационным заводом было спроектировано и изготовлено специальное оборудование, включающее установку для дробеударного формообразования-зачистки. Анализ, выполненный при изучении взаимодействия абразивных лепестков и обрабатываемой поверхности, показал значительное отличие контактных процессов при встречной и попутной схемах зачистки [4, 5]. Игнорирование этих отличий при организации технологического процесса приведет к неравномерности шероховатости обрабатываемой поверхности при встречной и попутной зачистках, что недопустимо для ответ-

ственных деталей летательных аппаратов. В связи с этим появилась необходимость комплексного исследования особенностей процесса попутной и встречной зачистки для деталей из алюминиевого сплава.

Исследование включало получение зависимости шероховатости поверхности от параметров режима зачистки, включая частоту вращения лепестковой круга, величину осадки лепестков в зоне контакта и подачу заготовки при попутном и встречном процессах зачистки.

Методы исследования. Комплексные исследования шероховатости поверхности образца при попутной и встречной зачистке лепестковым кругом проведены на спроектированной и изготовленной в ИРНИТУ зачистной установке ЛЗГ-1 (рис. 1). Данная установка разработана на базе токарно-винторезного станка 1К62, что позволило использовать механизмы подачи станка для регулирования величины осадки и подачи при исследованиях.

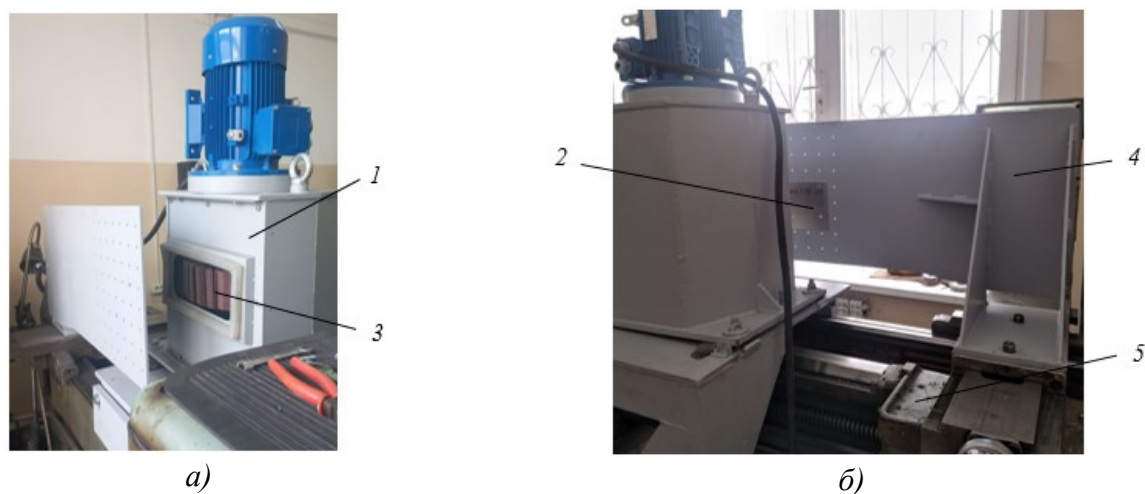


Рис. 1. Оборудование для комплексного исследования зачистки лепестковым кругом: 1 – зачистная установка; 2 – образец; 3 – абразивный лепестковый круг; 4 – кронштейн для закрепления образцов; 5 – токарно-винторезный станок 1К62

Образцы для экспериментального исследования были изготовлены в виде пластин из алюминиевого сплава B95T1 (с исходной шероховатостью $Ra = 0,465$ мкм), габаритными размерами 150×150 мм. При обработке образец 2 закреплялся на кронштейне 4, установленном на суппорте токарно-винторезного станка 1К62 (см. рис. 1). Благодаря тому, что образец установлен на суппорте, продольная подача заготовки в процессе зачистки осуществляется аналогичной подачей станка. Величину осадки лепестков устанавливали до начала обработки с помощью маховика механизма поперечной подачи суппорта. Зачистная установка 1 была надежно закреплена двумя прихватами с болтами на направляющих токарно-винторезного станка 4. Таким образом,

вибрация зачистной установки при работе практически исключалась.

Для измерения шероховатости поверхности образцов Ra использовали профилометр контактного типа Taylor Hobson Form Talysurf i200.

Зачистку проводили лепестковым кругом 2 (см. рис. 1), диаметром 350 мм, шириной 100 мм. Материал абразивного зерна – электрокорунд (25A), основа лепестков – ткань средней жесткости, зернистость – P60.

Комплексные исследования шероховатости поверхности образцов проведены методом полного факторного эксперимента типа 2^3 [22].

В табл. 1 представлены параметры режима зачистки для факторного эксперимента типа 2^3 .

Таблица 1. Режим зачистки лепестковым кругом (факторный эксперимент типа 2³)

Режим зачистки	Значение		
	Значение	Среднее	Значение
Частота вращения лепесткового круга, об/мин	600	800	1000
Подача продольная (попутная и встречная*), мм/мин	575	780	985
Осадки лепестков, мм	2	4,5	7

* При попутном направлении подачи при зачистке движение заготовки и движение лепестков вращающегося лепесткового круга в зоне контакта происходит в одном направлении, при встречном – направлено против движения лепестков вращающегося лепесткового круга.

Таблица 2. Результаты факторного эксперимента при попутном и встречном направлении продольной подачи при зачистке лепестковым кругом

№ опыта	Параметр режима обработки			Среднее значение Ra при зачистке, мкм	
	Частота вращения лепесткового круга v_k , об/мин.	Подача заготовки f , мм/мин.	Осадка лепестков t , мм	попутной	встречной
1	600	575	2	1,058	0,980
2	1000	575	2	0,964	0,925
3	600	985	2	1,084	1,040
4	1000	985	2	0,913	1,061
5	600	575	7	1,068	1,380
6	1000	575	7	1,806	2,035
7	600	985	7	1,051	1,134
8	1000	985	7	2,048	1,639

При попутном направлении подачи при зачистке:

$$Ra = 876,4416 t^{-7,2883} \cdot v_k^{0,712825 (3,6761gt - 1,46969)} \cdot 10^{0,10266 (9,0151g v_k - 26,0455)(3,6761gt - 2,1066)} \cdot f^{-0,29532 (9,0151g v_k - 26,0455)(3,6761gt - 2,1066)} \quad (1)$$

При встречном направлении подачи при зачистке:

$$Ra = 0,34383 t^{-0,8078} \cdot v_k^{0,3887 (3,6761gt - 1,20179)} \cdot f^{-0,28284 (3,6761gt - 2,1066)} \quad (2)$$

где t – осадка лепестков, мм; f – подача заготовки, мм/мин; v_k – частота вращения лепесткового круга, об/мин.

На рис. 2–4 представлены типовые графики шероховатости поверхности Ra , полученные по разработанным формулам (1) и (2). Данные получены в зависимости от осадки лепестков (от 2,5 до 7 мм), частоты вращения лепесткового круга (от 600 до 1000 об/мин) и подачи заготовки (800 мм/мин).

По представленным на рис. 2–4 зависимостям следует, что при малой частоте вращения круга (600 об/мин.) при попутном направлении подачи при зачистке шероховатость поверхности образцов Ra практически постоянна и не зависит от величины осадки лепестков, в то время как при встречном направлении подачи Ra зависит от последней. При этом значение Ra при встречном направлении подачи при зачистке значительно (до 20 %) отличается от значения при попутном. В остальных случаях при более высокой частоте вращения лепесткового круга величина шероховатости поверхности Ra как при попутном, так и при встречном направлениях подачи величина осадки лепестков оказывает существенное влияние. При этом чем больше частота вращения лепесткового круга, тем интенсивнее

В табл. 2 представлены результаты измерения шероховатости образцов после выполнения зачистки лепестковым кругом при попутном и встречном направлении продольной подачи (всего выполнено 48 опытов).

По результатам обработки данных получены регрессивные уравнения для определения шероховатости поверхности Ra в зависимости от режима зачистки (уровень доверительной вероятности 95 % в исследованном факторном пространстве).

величина осадки лепестков влияет Ra как при попутном, так и при встречном направлениях подачи. Это объясняется тем, что при увеличении скорости вращения лепесткового круга из-за его большого диаметра резко увеличивается сила удара и скорость резания абразивных зерен лепестков, в результате чего увеличивается глубина царапин и неравномерность профиля микрорельефа поверхности детали. Необходимо отметить, что при попутном и встречном направлениях подачи при зачистке с более высокой частотой вращения лепесткового круга абсолютное значение шероховатости поверхности Ra является практически постоянной величиной, незначительное отличие (не более 7,2 %) может быть только при максимальном значении осадки лепестков – 7 мм.

На рис. 5 представлены типичные графики шероховатости поверхности Ra , рассчитанные по формулам (1) и (2), построенные в зависимости от частоты вращения лепесткового круга при постоянной величине осадки лепестков и продольной подаче заготовки 600, 800 и 1000 мм/мин.

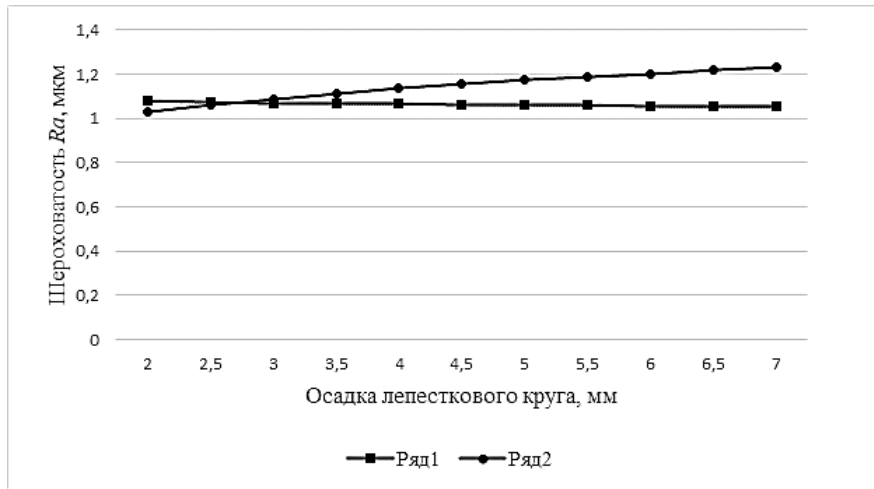


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности образцов от величины осадки лепесткового круга при частоте вращения лепесткового круга 600 об/мин. и продольной подачи заготовки 800 мм/мин. Ряды: 1 – при попутном направлении зачистки; 2 – при встречном направлении зачистки

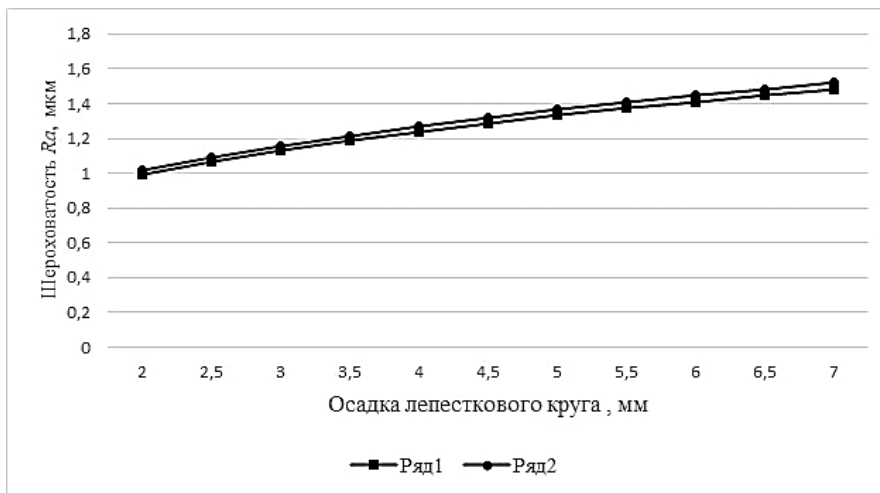


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности образцов от величины осадки лепесткового круга при частоте вращения лепесткового круга 800 об/мин. и продольной подачи заготовки 800 мм/мин. Ряды: 1 – попутное направление подачи при зачистке; 2 – встречное направление подачи при зачистке

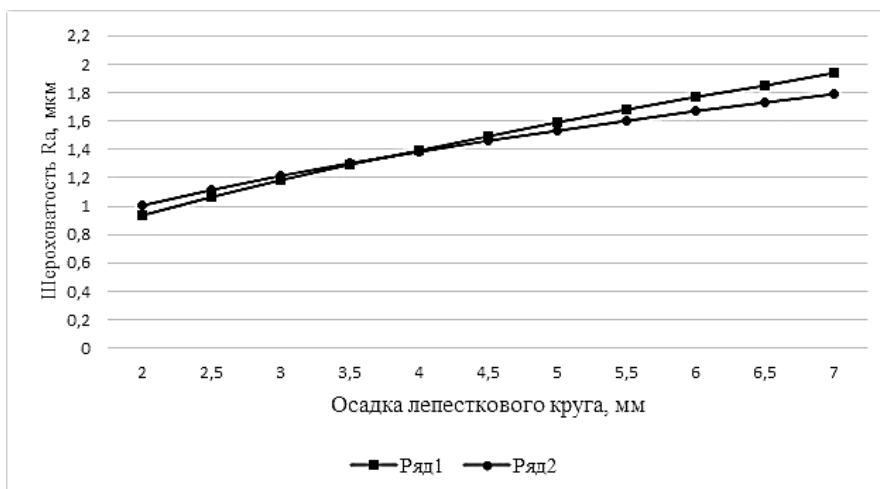


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности образцов от величины осадки лепесткового круга при частоте вращения лепесткового круга 1000 об/мин. и продольной подачи заготовки 800 мм/мин. Ряды: 1 – попутное направление подачи при зачистке; 2 – встречное направление подачи при зачистке

Из данных рис. 5 следует, что шероховатость поверхности Ra возрастает при увеличении частоты вращения лепесткового круга. Направление подачи заготовки при зачистке (попутное и встречное) во всем исследуемом факторном пространстве режимных параметров не влияет на характер изменения шероховатости поверхности.

На рис. 6 представлены типичные графики шероховатости поверхности Ra , рассчитанные по формулам (1) и (2), построенные в зависимости от величины подачи заготовки при постоянном значении осадки лепесткового круга и частоте вращения 600, 800 и 1000 об/мин.

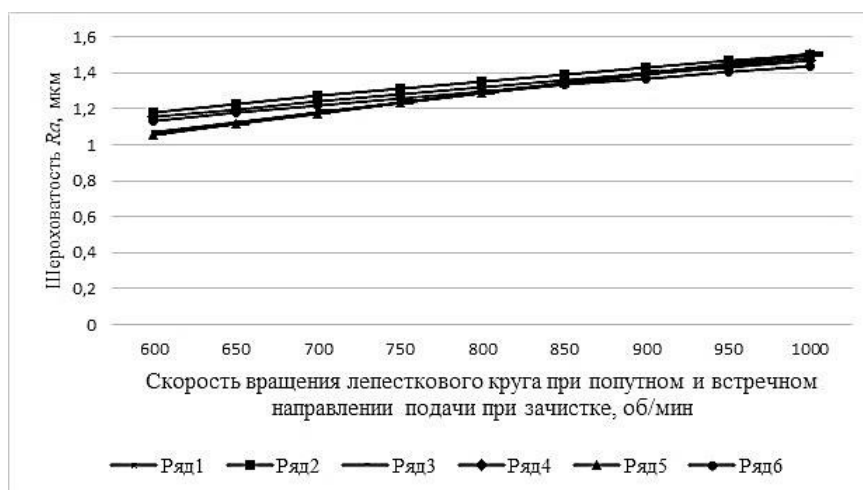


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности образцов от частоты вращения лепесткового круга при зачистке с осадкой 3,5 мм. Ряды: 1 – при подаче по попутному направлению 600 мм/мин.; 2 – при подаче по встречному направлению 600 мм/мин.; 3 – при подаче по попутному направлению 800 мм/мин.; 4 – при подаче по встречному направлению 800 мм/мин.; 5 – при подаче по попутному направлению 1000 мм/мин.; 6 – при подаче по встречному направлению 1000 мм/мин

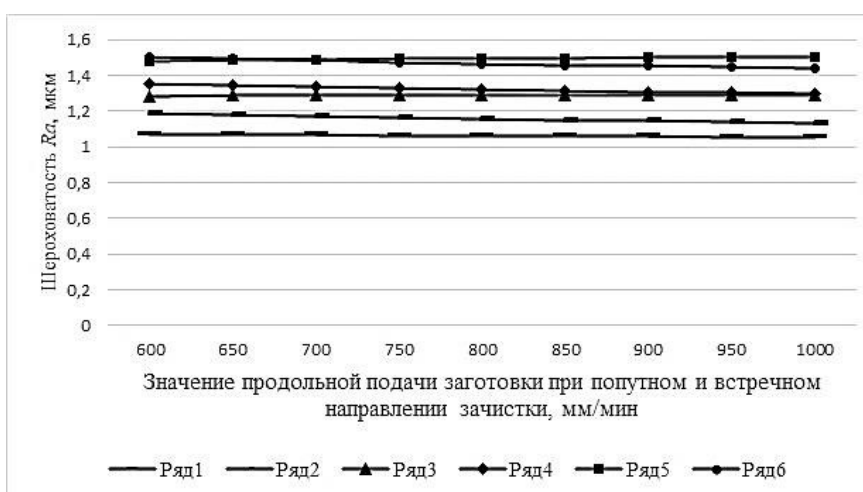


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности образцов от продольной подачи при зачистке с осадкой лепестков 3 мм. Ряды: 1 – при частоте вращения лепесткового круга 600 об/мин. и попутном направлении подачи при зачистке; 2 – при частоте вращения лепесткового круга 600 об/мин и встречном направлении подачи при зачистке; 3 – при частоте вращения лепесткового круга 800 об/мин и попутном направлении подачи при зачистке; 4 – при частоте вращения лепесткового круга 800 об/мин и встречном направлении подачи при зачистке; 5 – при частоте вращения лепесткового круга 1000 об/мин и попутном направлении подачи при зачистке; 6 – при частоте вращения лепесткового круга 1000 об/мин и встречном направлении подачи при зачистке

По результатам исследования были сделаны выводы, что при попутном направлении подачи при зачистке шероховатость поверхности Ra (см. рис. 6, ряд 1, 3 и 5) имеет постоянный характер и при постоянной частоте вращения лепесткового круга не зависят от величины подачи заготовки. Однако при встречном направлении подачи, в сравнении с попутным, при одинаковых значениях частоты вращения лепесткового круга

и осадки лепестков изменение шероховатости все-таки наблюдается, но оно незначительно по абсолютной величине. Это объясняется тем, что при встречном направлении подачи, несмотря на достаточно небольшие значения продольной подачи (от 0,575 до 0,985 м/мин) по сравнению с высокой линейной скоростью лепестков в зоне контакта с поверхностью детали (от 659,4 до 1099 м/мин), при зачистке лепестковым

кругом диаметром 350 мм и скорости вращения от 600 до 1000 об/мин. подача несколько увеличивает скорость резания.

Таким образом, разработанные математические модели шероховатости поверхности для попутного (1) и для встречного (2) направлений при зачистке позволяют рассчитать и проанализировать зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от режима в пределах исследуемого факторного пространства режимных параметров.

Заключение. Проведенный полный факторный эксперимент для определения шероховатости поверхности пластины из алюминиевого сплава В-95Т1 при попутном и встречном направлениях подачи при зачистке лепестковым кругом показал, что по мере увеличения частоты вращения лепесткового круга или величины осадки лепестков шероховатость обрабатываемой поверхности детали увеличивается. Однако максимальное значение шероховатости обработанной поверхности Ra в исследованном факторном пространстве не повысило 2,03 мкм.

Литература

1. Пашков А.Е. Об особенностях применения Отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестн. Иркутск. гос. технич. ун-та. 2015. № 5(100). С. 17-22.
2. Пашков А.Е., Шматов В.С. Особенности технологии дробеударного упрочнения крупногабаритных деталей самолетов // Управление технологическими процессами машиностроительного производства. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. технич. ун-та., 1998. С. 62-66.
3. Гребенников Д.С., Максименков В.И. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестн. Воронеж. гос. технич. ун-та. 2019. Т. 15, № 1. С. 116-121. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.1.018
4. Патент № 2759165 С1 РФ. Способ обработки радиальным лепестковым кругом поверхности детали из алюминиевого сплава В95: опубл. 09.11.2021 / В. П. Кольцов, Д. А. Стародубцева, Ле Чи Винь [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут».
5. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Пискунова Ю.Ю. Лабораторный комплекс для исследования зачистки лепестковым кругом // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): Мат-лы XIV Всеросс. науч.-технич. конф., Иркутск, 13–14 мая 2024 г. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. технич. ун-та, 2024. С. 77-83.
6. Фалеев С.Ю. Автоматизация процесса анализа формы крупногабаритных деталей сложной формы по трехмерным моделям // VIII междунар. конф. «Проблемы механики современных машин»: Сб. ст. конф., оз. Байкал, 04–09 июля 2022 года. Улан-Удэ: Изд-во Вост.-Сиб. гос. ун-та технологий и управления, 2022. С. 554-562. DOI: 10.53980/9785907599055_554
7. Дубровский П.В. Исследование процессов полирования авиационных деталей // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: тезисы докл. V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Ульяновск, 24-25 ноября 2016 г.). Ульяновск: Изд-во Ульяновск. ун-та, 2016. С. 141–142.
8. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. технич. ун-та. 2005. 138 с.
9. Димов Ю.В. Перспективы использования лепестковых кругов при изготовлении деталей самолета // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. технич. ун-та., 2000. С. 3–10.
10. Антипин С.А. Определение параметров искажений форм геометрии маложестких крупногабаритных деталей с учетом влияния на них силы собственного веса и условий закрепления // Вестн. Воронеж. гос. технич. ун-та. 2024. Т. 20, № 3. С. 175-184. DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.3.027
11. Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В. Разработка методики анализа геометрических параметров длинномерных панелей // Вестн. Магнитогорск. гос. технич. ун-та. 2023. Т. 21, № 2. С. 102-113. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113
12. 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 // Вестн. двигателестроения. 2012. № 1. С. 181–185.
13. Воскобойников Б.С., Гречиков М.М., Гуськова Г.И. Шлифовальные технологии и высокоточное оборудование // Комплект: инструмент, технология, оборудование. 2008. № 1. С. 12–30.
14. Рыкунов Н.С., Сухов Е.И., Волков Д.И. Высокопроизводительная обработка материалов методом глубинного шлифования // Оптимизация операций механической обработки: межвуз. сб. науч. тр. Ярославль: Изд-во Ярослав. ун-та, 1984. С. 23–32.
15. Гребенников Д.С. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестн. Воронеж. гос. технич. ун-та. 2019. Т. 15, № 1. С. 116-121. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.1.018
16. Максименков В.И., Молод М.В., Вялых В.В., Молод Ю.В. Повышение качества слоистых панелей канала воздухозаборника самолета // Вестн. Воронеж. гос. технич. ун-та. 2024. Т. 20, № 1. С. 116-119. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.1.016

17. Патент № 2759165 С1 Российская Федерация, МПК В24В 1/00, В24Д 13/02. Способ обработки радиальным лепестковым кругом поверхности детали из алюминия сплавом B95 : № 2020118529 : заявл. 05.06.2020: опубл. 09.11.2021 / В. П. Кольцов, Д. А. Стародубцева, Ч. В. Ле [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Публичное акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Иркут».
18. Vetkasov N., Ulitin S., Krupennikov O., Sapunov V., Ankilov A. Simulation of thermal strength of the process of flat grinding of workpieces in intermittent circles // MATEC web of conferences: The proceedings International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019), Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 298. Sevastopol: EDP Sciences, 2019. P. 00022. DOI: 10.1051/mateconf/201929800022.
19. Tamarkin M., Tishchenko E., Azarova A., Butenko V. Surface quality formation at polymer composite details' abrasive processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, May 22–27 2020. Vol. 918. Novosibirsk, 2020. P. 012114. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012114
20. Fedorov R.V., Generalov D.A., Sherkunov V.V. Improving the Efficiency of Fuel Combustion with the Use of Various Designs of Embrasures // Energies. 2023. Vol. 16, № 11. P. 4452. DOI: 10.3390/en16114452
21. Sapunov V., Vetkasov N., Khudobin L. The study of the health of grinding wheels on a bakelite bunch, heat-treated in a microwave field // Materials Today: Proceedings: 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020, Sevastopol, September 07-11, 2020. Elsevier Ltd, 2021. P. 1711-1713. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.231
22. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Машиностроение, 1976. 279 с.
- 09, 2022. Ulan-Ude: Publishing house of the East-Siberian State University of Technology and Management, 2022. P. 554-562. DOI: 10.53980/9785907599055_554
7. Dubrovskiy P.V. Research of polishing processes of aircraft parts // Life Cycle Management Systems of aviation equipment products: current problems, research, implementation experience and development prospects: abstracts of V International Scientific and Practical Conference (Ulyanovsk, November 24-25, 2016). Ulyanovsk: Ulyanovsk University Publishing House, 2016. P. 141-142.
8. Pashkov A.E. Technological connections in the process of manufacturing of long sheet parts. Irkutsk: Irkutsk. state technical university Publishing House, 2005. 138 p.
9. Dimov Y.V. Prospects of using petal circles in manufacturing of airplane parts // Increasing the efficiency of technological processes in mechanical engineering: collection of scientific articles Irkutsk: Irkutsk: Irkutsk. state technical university Publishing House, 2000. P. 3-10.
10. Antipin S.A. Determination of the distortion parameters of the geometry forms of the low-rigid large-size parts taking into account the influence of the self-weight force and fastening conditions on them // Bulletin of Voronezh State Technical University. Voronezh State Technical University. 2024. Vol. 20, № 3. P. 175-184. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.3.027
11. Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoilenko O.V. Development of the methodology for analyzing the geometrical parameters of long panels (in Russian) // Bulletin of Magnitogorsk. Magnitogorsk State Technical University. 2023. Vol. 21, № 2. P. 102-113. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113
12. Kalchenko V.I., Kalchenko V.V., Kologoida A.V., Ki-rienko S.Yu. Grinding of curvilinear surfaces of gas-turbine engine blades by abrasive belt with the help of CNC robot RM-01 // Bulletin of Engine Engineering. 2012. № 1. P. 181-185.
13. Voskoboynikov B.S., Grechikov M.M., Guskova G.I. Grinding technologies and high-precision equipment (in Russian) // Komplekt: Instrument, technology, equipment. 2008. № 1. P. 12-30.
14. Rykunov N.S., Sukhov E.I., Volkov D.I. Highly productive processing of materials by a method of deep grinding (in Russian) // Optimization of machining operations: interuniversity collection of scientific articles Yaroslavl: Publishing house of Yaroslavl University, 1984. P. 23-32.
15. Grebennikov D.S. Forming of the wing panels of a long-range airplane (in Russian) // MPEI Bulletin Voronezh State Technical University. 2019. Vol. 15, № 1. P. 116-121. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.1.018
16. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Vyalykh V.V., Molod Yu. Voronezh State Technical University. 2024. Vol. 20, № 1. P. 116-119. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.1.016
17. Patent № 2759165 C1 Russian Federation, МПК В24В 1/00, В24Д 13/02. Method of processing by radial le-blade wheel of the surface of the part from aluminum alloy B95: № 2020118529: filed. 05.06.2020: published 09.11.2021 / Vol. P. Koltsov, D.A. Starodubtseva, C.V. Le [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", Public Joint Stock Company "Irkut Research and Production Corporation".
18. Vetkasov N., Ulitin S., Krupennikov O., Sapunov V., Ankilov A. Modeling of thermal strength of the process of flat grinding of workpieces by intermittent wheels // MATEC web of conferences: Proceedings of the International Conference "Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019), Sevastopol, September 09-13, 2019. Vol. 298. Sevastopol: EDP Sciences, 2019. P. 00022. DOI: 10.1051/mateconf/201929800022
19. Tamarkin M., Tishchenko E., Azarova A., Butenko V. Formation of surface quality during abrasive blasting of parts

References

1. Pashkov A.E. About peculiarities of application of domestic and foreign technology of airplane skins and panels forming // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2015. № 5(100). P. 17-22.
2. Pashkov A.E., Shmatkov V.S. Peculiarities of the shot peening technology for large-size aircraft parts // Management of technological processes of machine-building production. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publishing House, 1998. P. 62-66.
3. Grebennikov D.S., Maksimenkov V.I. Formation of the wing panels of a long-range airplane // Bulletin of Voronezh State Technical University. 2019. Vol. 15, № 1. P. 116-121. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.1.018
4. Patent № 2759165 C1 RF. Method of radial lobe machining of the part surface made of aluminum alloy B95: published 09.11.2021 / V.P. Koltsov, D.A. Starodubtseva, Le Chi Vinh [et al.]; applicant FGBOU VO "Irkutsk National Research Technical University", PJSC "Irkut Research and Production Corporation".
5. Le Chi Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Pisku-nova Y.Yu. Laboratory complex for research of brushing with a petal wheel // Life cycle of structural materials (from production to utilization): Proceedings of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference, Irkutsk, May 13-14, 2024, Irkutsk: Izd-v. Irkutsk State Technical University, 2024. P. 77-83.
6. Faleev S.Yu. Automation of the process of shape analysis of large-size parts of complex shape by three-dimensional models // VIII Intern. conf. "Problems of mechanics of modern machines": Collection of articles conf., Lake Baikal, July 04-

- from polymer composites // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, May 22-27 2020. Vol. 918. Novosibirsk, 2020. P. 012114. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012114
20. Fedorov R.V., Generalov D.A., Sherkunov V.V. Improvisation of the fuel combustion efficiency using different designs of embrasures // *Energia*. 2023. Vol. 16, № 11. P. 4452. DOI: 10.3390/en16114452
21. Sapunov V., Vetkasov N., Khudobin L. The study of the health of grinding wheels on a bakelite bunch, heat-treated in a microwave field // *Materials Today: Proceedings: 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020, Sevastopol, September 07-11, 2020*. Elsevier Ltd, 2021. P. 1711-1713. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.231
22. Adler Y.R. Planning of experiment at search of optimum conditions. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 279 p.