

УДК 621.735.016.2

2.5.5 Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки (технические науки)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО ПРИВОДА ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА

И. Н. Дроздов¹, А. Ю. Попов²¹ Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия² Омский государственный технический университет, Омск, Россия

EFFECTIVENESS OF USING A SLIDER-CRANK MECHANISM FOR WAFFLE BACKGROUND MILLING

Igor N. Drozdov¹, Andrey Yu. Popov²¹ JSC "Federal Research and Production Center "Progress", Omsk, Russia² Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В работе представлена конструкция экспериментального привода подачи режущего инструмента на основе кривошипно-ползунного механизма. Особенностью технологии фрезерования регулярного рисунка вафельного фона является необходимость многократного повторения ячеек, как правило, прямоугольной формы. Это требует разработки механизма подачи инструмента, обеспечивающего высокую скорость обработки и существенное снижение сил резания для предотвращения деформации формы ячейки. Представленная в работе конструкция привода обеспечивает скорость подачи до 43 м/мин при скорости резания до 942 м/мин, что исключает выход механизма за пределы габарита ячейки, а также обеспечивает значительное снижение сил резания до 10 Н и снимает проблему применения смазочно-охлаждающих жидкостей – обработка ведется всухую. Это особенность скоростного режима фрезерования, когда скорость подачи и скорость резания существенно выше традиционных, а глубина резания не превышает 1 мм. Производительность такого вида фрезерования существенно выше традиционных режимов и, кроме того, практически не вызывает нагрева детали, так как почти

Abstract. The paper presents the design of an experimental cutting tool feed drive based on a slider-crank mechanism. A feature of the technology of milling a regular waffle background pattern is the need for regular repetition of cells, usually rectangular shape. This requires the development of a tool feed mechanism that provides a high processing speed and a significant reduction in cutting forces to prevent deformation of the cell shape. The drive design presented in the work provides feed rate up to 43 m/min with cutting speed up to 942 m/min. This eliminates the exit of the mechanism out of the cell dimensions, as well as provides a significant reduction of cutting forces up to 10 N and removes the problem of using coolant (dry machining). This is a feature of the high-speed milling mode, when the feed rate and cutting speed are significantly higher than traditional ones, and the cutting depth does not exceed 1 mm. The productivity of this milling process is much higher than traditional milling modes and, in addition, it causes less heating of the part, as almost all the heat escapes with the chips. The practical significance of the development is the increase of productivity of the equipment for waffle background milling in fuel tanks from aluminium alloys due to the application

все тепло уходит со стружкой. Практическая значимость разработки заключается в повышении производительности оборудования для фрезерования вафельного фона в топливных баках из алюминиевых сплавов за счет применения высокоскоростного привода на основе кривошипно-ползунного механизма, который предлагается монтировать вместо штатного шпинделя на крупногабаритных станках фрезерного портального типа. Это позволяет переходить на режимы высокоскоростного фрезерования при силе резания в несколько ньютонов, что позволяет уменьшить вес силовых и движущихся частей привода икратно повысить скорость подачи.

Ключевые слова: привод подачи, кривошипно-ползунный механизм, фреза, технология, станок, сила резания

of the high-speed drive based on the slider-crank mechanism. The authors offered to mount it instead of the standard spindle on large-sized milling gantry-type machines. This makes it possible to use the high-speed milling modes at cutting forces of several newtons for reducing the weight of the power and moving parts of the drive and increasing the feed rate.

Key words: feed drive, crank-slide mechanism, milling cutter, technology, machine tool, cutting force

Для цитирования: Дроздов, И. Н. Эффективность применения кривошипно-ползунного привода для фрезерования вафельного фона / И. Н. Дроздов, А. Ю. Попов. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-96-104. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 96–104.

For citation: Drozdov, I. N., & Popov, A. Yu. (2024). Effectiveness of using a slider-crank mechanism for waffle background milling. *Architecture, Construction, Transport*, (2(108)), pp. 96-104. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-96-104.

1. Введение

Обработка вафельного фона производится на листовых заготовках из алюминиевых сплавов¹ [1, 2]. Заготовки не жесткие, с допусками, большими габаритными размерами по длине и ширине, обработка производится на крупногабаритных станках с массой движущихся частей до 12 тонн. Это приводит к большим инерционным силам при перемещении узлов станка на расстояниях 50–100 мм – габариты ячейки вафельного фона

[3, 4]. Высокие скорости подачи необходимы для обеспечения требуемой производительности. Скорость перемещения шпиндельного узла в пределах 50 мм должна возрастать или снижаться от нуля и до 10–15 м/мин. Ускорения значительны, и современные станки работают в режиме перегрузки приводов, механических и электронных систем. Эта проблема не имеет решения при традиционных подходах к разработке кинематики, конструкций и технологий обработки [5, 6, 7].

¹ГОСТ 22350-91. Корпус ракеты на жидком топливе. Термины и определения = Body of liquid-fuel missile. Terms and definitions : государственный стандарт союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 15.05.91 № 688 : дата введения 01.07.92. – Москва : Изд-во стандартов, 1991. – 16 с. – Текст : непосредственный.

Известна технология обработки деталей, в том числе из закаленных сталей, специальными фрезами со скоростями от 200 и выше м/мин, глубиной до 1 мм и подачами в пределах 1 мм/зуб без применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Такие фрезы выпускаются серийно.

При обработке алюминиевых сплавов такой вид обработки также применяется, но минимальные режимы резания, которые требуются для высокоскоростной обработки алюминиевых сплавов, превышают возможности современных металлорежущих станков. Необходимы частоты вращения более 30 000 об/мин и скорости подач более 30 м/мин, что позволяет достигать производительности выше традиционных режимов. Высокоскоростная обработка интересна при обработке вафельного фона топливных баков с отсутствием охлаждения [8, 9]. Как правило, это требование, которое исключает дополнительные дорогостоящие операции по удалению остатков СОЖ из рельефа обработанной поверхности. Процесс высокоскоростной обработки алюминиевых сплавов исследован фрагментарно, и обоснованных рекомендаций по выбору режимов, определению конструкции инструмента и стратегии обработки в имеющейся литературе недостаточно [10, 11, 12].

Целью исследования является повышение производительности чернового фрезерования ячеек вафельного фона с применением привода подач на основе кривошипно-ползунного механизма и определение рациональных режимов обработки при скорости подачи до 43 м/мин и скорости резания до 942 м/мин.

Актуальность работы заключается в разработке конструкции привода и технологии фрезерования ячеек вафельного фона на листах из алюминиевого сплава с производительностью на черновых операциях выше лучших зарубежных образцов при многократно меньших затратах на оборудование.

Специфика исследований заключается в выходе на такую область режимов, которую было крайне сложно достичь на оборудовании традиционной конструкции с шарико-винтовыми парами на всех координатах. Разгон, торможе-

ние и выход на скорость подачи до 43 м/мин и скорость резания до 942 м/мин на коротких участках реализованы облегченным приводом с кривошипно-ползунным механизмом. Такое сочетание конструктивных и технологических факторов требует экспериментальных исследований в довольно узкой области режимов, но с высокой точностью.

2. Материалы и методы

Проблему целесообразно решать переходом на скоростное фрезерование, при котором скорость резания поднимается до 1000 м/мин, подача продольная свыше 40 м/мин, а глубина резания в пределах 1 мм. Производительность на таких режимах выше, чем на традиционных (под производительностью понимается объем удаляемого металла в единицу времени). Особенностью скоростного фрезерования является отсутствие СОЖ, а силы резания не превышают 30 Н даже кратковременно. Это позволяет оснащать привод малогабаритными электрошпинделями, что снижает динамические нагрузки, и применять оппозитный кривошипно-ползунный механизм для подачи инструмента по одной координате (рис. 1) [5, 6]. Две другие координаты при построчном удалении припуска работают с подачами не более 2 м/мин.

Позиционирование рабочего органа (рис. 1, 2) в вертикальной плоскости осуществляется путем перемещения шпиндельной головки станка. В горизонтальной плоскости рабочий орган перемещается с помощью штатных элементов станка – шарико-винтовой передачи. Кривошипно-ползунный механизм оснащен дополнительным электроприводом 13, передающим вращение на коленвал 6 через муфту 14. Для повышения жесткости привод горизонтального перемещения режущего инструмента установлен на платформе 5, к верхней поверхности которой прикреплены направляющие 15. Вращение вала электродвигателя 13 через коленвал 6 передается на шатуны 8, соединенные шарнирно с ползунами 7. К одному из ползунков 7 с помощью скобы 10 неподвижно крепится привод 11 режущей головки 12.

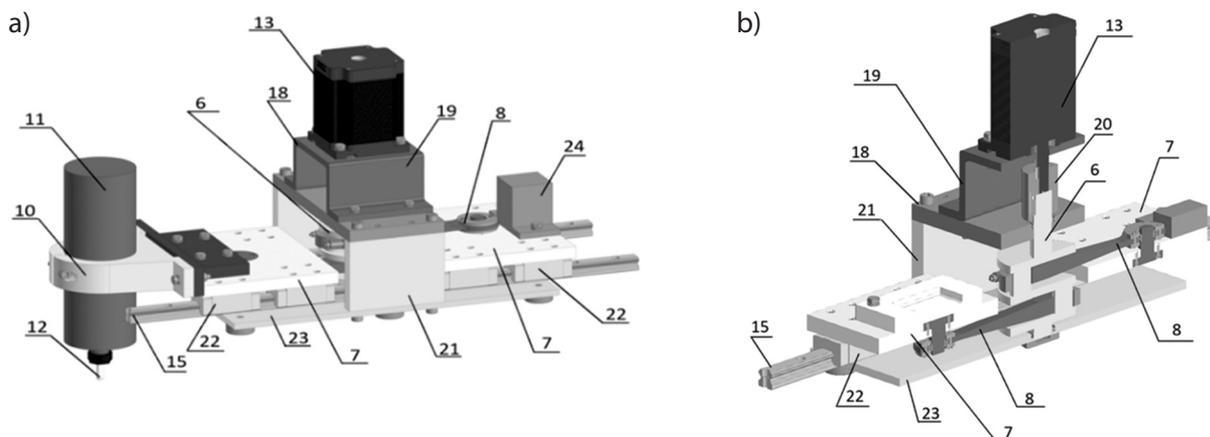


Рис. 1. Вид спереди продольного разреза кривошипно-ползунного привода подачи:
 а) вид механизма, б) разрез кривошипно-ползунного механизма привода без шпинделя и противовеса
 Fig. 1. Longitudinal cut of the slider-crank feed drive (frontal view):
 а) view of the mechanism, б) cut of the slider-crank drive mechanism without spindle and counterweight

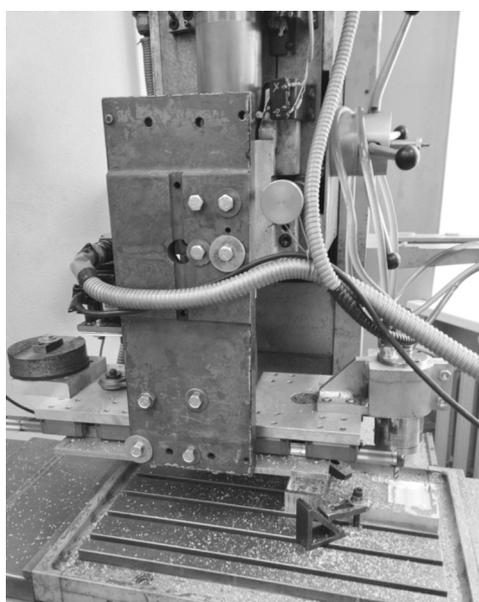


Рис. 2. Вид наладки с балансировкой механизма в вертикальной плоскости
 Fig. 2. Adjustment with balancing of the mechanism in the vertical plane

На рисунке 1b показан продольный разрез привода подачи. Привод содержит электродвигатель 13, неподвижно закрепленный на плите 18 при помощи фланца 19, который передает вращение коленвалу 6 через муфту 20. Плита 18 закреплена на стенках 21 винтовым соединением со штифтами. Вращение с электродвигателя 11 через коленвал 6 передается на шатуны 8, соеди-

ненные шарнирно с ползунами 7. При помощи восьми кареток 22 ползуны 7 линейно перемещаются по рельсовым направляющим 15, закрепленным болтами на плоскости нижней плиты 23. На одном из ползун 7 установлена пластина 10, на другом – противовес 24, уравнивающий динамические силы [7].

3. Результаты и обсуждение

Определение потребляемой на процесс обработки мощности в зависимости от режимов резания

Для решения задачи обработки вафельного фона с помощью высокоскоростного фрезерования были выполнены исследования со следующими входными данными:

- 1) 2- и 3-зубыми фрезами для обработки алюминиевых сплавов диаметром фрез традиционной конструкции 6–10 мм под изделие;
- 2) черновая и чистовая обработка производились одной и той же фрезой;
- 3) критерием для выбора конструкции фрезы и режимов обработки была принята величина мощности, затраченная на сьем припуска за один проход при черновой обработке. При чистовой обработке – шероховатость обработанной поверхности;
- 4) при изготовлении ячеек вафельного фона использовался материал Д16т.

Регистрировалась потребляемая мощность при черновой обработке электрошпинделя. Сила тока холостого хода и под нагрузкой определялись по показаниям частного регулятора.

Были проведены испытания зависимости мощности электрошпинделя от его оборотов при постоянной подаче на зуб и глубине резания. Полученные результаты отражены в таблице 1 и представлены в виде графика на рис. 3.

Частота вращения кривошипа в 6 Гц обеспечивает максимальную скорость продольной подачи – 43 м/мин.

Таблица 1/Table 1

Данные зависимости мощности электрошпинделя от его оборотов при постоянной подаче на зуб и глубине резания

Data on the dependence of the electric spindle power on its revolutions at constant feed rate per tooth and depth of cut

	Обороты электрошпинделя, об/мин		
	10 000	20 000	30 000
Поперечная подача, %	20	40	60
Частота вращения кривошипа, Гц	2	4	6
Сила тока холостого хода, А	2.9	3.16	3.2
Сила тока при резании, А	3.7	4	4
Затраченная мощность, кВт	0.34	0.36	0.34
Расчетная мощность, кВт	0.66	1.32	1.99

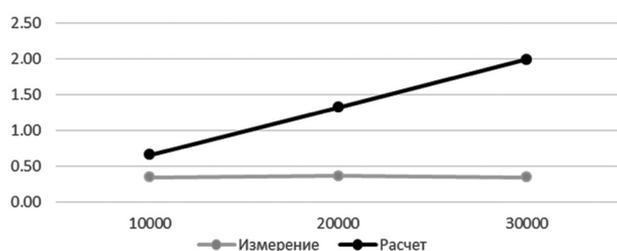


Рис. 3. График зависимости мощности электрошпинделя от его оборотов при постоянной подаче на зуб и глубине резания
Fig. 3. Diagram on the dependence of the electric spindle power on its revolutions at constant feed rate per tooth and depth of cut

Далее провели испытания зависимости мощности электрошпинделя от подачи на зуб при постоянных оборотах электрошпинделя и глубине резания. Полученные результаты отражены в таблице 2 и представлены в виде графика на рис. 4.

Для набора данных был поставлен эксперимент по определению зависимости мощности

Таблица 2/Table 2

Зависимость мощности мотора шпинделя от подачи на зуб S_z при постоянных оборотах электрошпинделя $n = 20\,000$ об/мин и глубине резания $t = 0.5$ мм
Dependence of spindle motor power on feed per tooth S_z at constant spindle speed $n = 20\,000$ rpm and cutting depth $t = 0.5$ mm

	Подача на зуб S_z , мм/мин		
	0.125	0.25	0.5
Поперечная подача, %	10	20	40
Частота вращения кривошипа, Гц	2	4	6
Сила тока холостого хода, А	3.15	3.15	3.15
Сила тока при резании, А	3.4	3.55	4
Затраченная мощность, кВт	0.11	0.17	0.36
Расчетная мощность, кВт	0.49	0.83	1.66

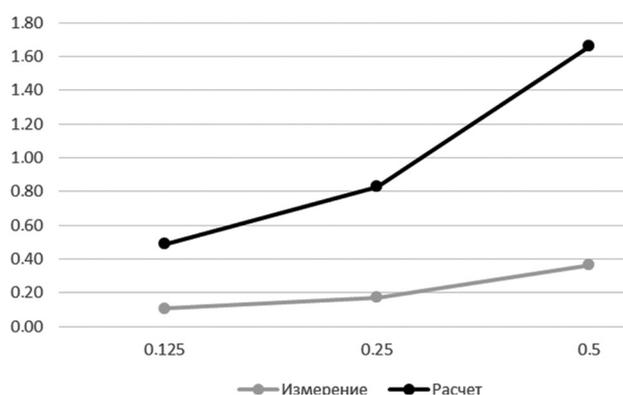


Рис. 4. График зависимости мощности электрошпинделя от подачи на зуб при постоянных оборотах шпинделя и глубине резания
Fig. 4. Diagram of dependence of electrospindle power on feed rate per tooth at constant spindle speed and depth of cut

шпинделя от глубины резания при постоянных оборотах шпинделя и подаче на зуб. Полученные результаты отражены в таблице 3 и представлены в виде графика на рис. 5.

Сравнительные испытания фрез, имеющих на рынке, с двумя и тремя зубьями показали, что

Таблица 3/Table 3

Зависимость мощности электрошпинделя от глубины резания при постоянных оборотах электрошпинделя $n = 20\,000$ об/мин и подаче на зуб $S_z = 0.5$ мм

Dependence of electrospindle power on depth of cut at constant electrospindle speed $n = 20\,000$ rpm and feed rate per tooth $S_z = 0.5$ mm

	Глубина резания t , мм				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Поперечная подача, %	40	40	40	40	40
Частота вращения кривошипа, Гц	6	6	6	6	6
Сила тока холостого хода, А	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26
Сила тока при резании, А	3.5	3.8	3.9	4.08	4.85
Затраченная мощность, кВт	0.10	0.23	0.27	0.35	1.9
Расчетная мощность, кВт	0.66	1.32	1.97	2.63	3.3

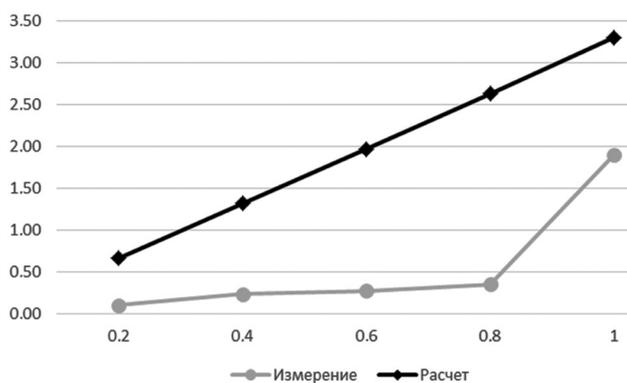


Рис. 5. График зависимости мощности электрошпинделя от глубины резания при постоянных оборотах электрошпинделя и подаче на зуб

Fig. 5. Diagram of dependence of electrospindle power on depth of cut at constant spindle speed and feed rate per tooth

2-зубая фреза обеспечивает режимы на 20–30 % ниже, чем 3-зубая, а значит, интенсивность съема припуска при одних и тех же величинах S_z и t ниже, что объясняется ее меньшей жесткостью при одинаковом вылете. Особенностью работы фрез на скоростных режимах по алюминиевым сплавам объясняется совершенно иной геометрией их режущей части по сравнению с фрезами для скоростной обработки закаленных сталей, а именно радиус округления лезвия не более 0.01 мм, передний угол – 20–30 градусов, угол подъема спирали – 30 градусов [13, 14]. Угол подъема спирали в 30 градусов был выбран для повышения осевой жесткости инструмента.

Методика определения рациональных режимов под другой материал детали и другую геометрию инструмента заключается в подборе режимов V , S_z , t по потребляемой мощности за один проход. Анализ графиков показывает:

1. При постоянной подаче на зуб $S_z = 0.5$ мм и глубине резания $t = 0.4$ мм скорость резания в пределах от 314 м/мин до 942 м/мин не оказала видимого влияния на потребляемую мощность. Расчетная мощность на калькуляторе Walter machining calculator должна была монотонно возрастать (рис. 3).
2. При постоянной скорости резания $V = 628$ м/мин и глубине резания $t = 0.5$ мм при изменении подачи на зуб S_z от 0.125 до 0.5 мм (рис. 4) потребляемая на процесс резания мощность увеличилась с 0.11 до 0.36 кВт при мощности, затрачиваемой на холостой ход в 1.4 кВт.
3. При постоянных скорости резания $V = 628$ м/мин и подаче на зуб $S_z = 0.5$ мм наблюдалось резкое увеличение потребляемой на процесс резания мощности при превышении глубины резания t более 0.8 мм (рис. 5).

Таким образом, можно определить рациональные режимы резания с точки зрения объема снимаемого припуска при постоянной подаче на зуб $S_z = 0.5$ мм, постоянной скорости резания $V = 942$ м/мин и глубине резания $t = 0.8$ мм для изготовленного механизма и применяемого инструмента и материала детали. Подача на зуб S_z и скорость резания V ограничиваются величиной

скорости подачи шпинделя в кривошипно-шатунном механизме при предельной частоте вращения шпинделя 30 000 оборотов. Исследования динамических явлений на предельных режимах работы кривошипно-шатунного механизма привели к выводу, что минутную подачу по оси X целесообразно ограничивать 20 м/мин.

Скачок мощности при превышении глубины резания более 0.8 мм можно объяснить размером фаски на уголках зубьев фрезы – $0.8 \times 45^\circ$. При выходе припуска на цилиндрическую часть фрезы потребляемая мощность возрастает по экспоненте.

Чистовая обработка производилась на режимах в два раза ниже, чем черновая по всем параметрам, что позволило обеспечить шероховатость поверхности и точность обработки в пределах требований конструкторской документации. Чем ниже режимы обработки, тем выше шероховатость обработанной поверхности, но до определенного предела [15–18]. Занижение режимов обработки в три раза и более не привели к существенному повышению чистоты обработанной поверхности.

4. Заключение

1. Проведенная серия экспериментов на физической модели прототипа привода подачи специального фрезерного станка под-

твердила работоспособность конструкции и высокую производительность на операции черновой обработки ячеек вафельного фона.

2. Установлены закономерности потребляемой на процесс резания мощности от режимов резания: скорости продольной подачи инструмента до 43 м/мин и скорости резания до 942 м/мин при обработке алюминиевых сплавов, что позволило применить в приводе малогабаритный шпиндель весом 6 кг, частотой вращения до 40 000 об/мин и мощностью 3 кВт.

Результаты работы целесообразно использовать при разработке конструкции привода подач на базе кривошипно-ползунного механизма по одной координате для крупногабаритных фрезерных станков портальных и вертикальных, которые не позволяют обеспечить высокую скорость перемещения тяжелых многотонных узлов с высокой скоростью на ограниченное расстояние. Высокоскоростной привод по одной координате позволяет компенсировать низкие динамические свойства крупногабаритных узлов станков тяжелого класса. Штатные величины подачи крупногабаритных станков по другим необходимым координатам позволяют позиционировать привод и перемещать с достаточной скоростью (2–4 м/мин).

Библиографический список

1. Михрютин, В. В. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов / В. В. Михрютин, М. А. Шерстобитов. – Текст : непосредственный // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2012. – № 2 (23). – С. 279–284.
2. Писаренко, А. А. Механообрабатывающий центр модели СВО-3500 для формирования вафельного фона на крупногабаритных конструкциях изделий ракетно-космической техники / А. А. Писаренко, А. М. Ковалев. – Текст : непосредственный // Вестник НПО Техномаш. – 2018. – № 2 (6). – С. 86–90.
3. Лизин, В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций / В. Т. Лизин, В. А. Пяткин. – Москва : Машиностроение, 1976. – 408 с. – Текст : непосредственный.
4. Батрутдинов, Р. Г. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов / Р. Г. Батрутдинов, С. К. Сысоев. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. – Т. 1, № 7. – С. 7–8.
5. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – Москва : Наука, 1975. – 640 с.
6. Дворников, Л. Т. Теория кривошипно-ползунных механизмов : монография / Л. Т. Дворников, Н. С. Большаков. – Новокузнецк : НПФ, 2008. – 138 с. – ISBN 978-5-8441-0282-0.
7. Белов, И. В. Кривошипно-ползунный механизм с двумя шатунами / И. В. Белов, Д. В. Семенов, А. А. Белов. – Текст : непосредственный // Оригинальные исследования. – 2023. – Т. 13, № 8. – С. 20–27.

8. Chen, Yu. Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance / Yu. Chen, Yu. Sun, D. Yang. – DOI 10.1007/s12206-016-1209-z. – Текст : непосредственный // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2017. – Vol. 31, No. 1. – P. 75–85.
9. Dynamic modeling and identification of a slider-crank mechanism / J.-L. Ha, R.-F. Fung, K.-Yu. Chen, Sh.-Ch Hsien. – DOI 10.1016/j.jsv.2005.03.011. – Текст : непосредственный // *Journal of Sound and Vibration*. – 2006. – Vol. 289, No. 4. – pp. 1019–1044.
10. Ibaraki, S. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes / S. Ibaraki, T. Shimizu. – DOI 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001. – Текст : непосредственный // *Precision Engineering*. – 2010. – Vol. 34, No. 4. – P. 675–682.
11. Зайцев, А. М. Разработка направлений повышения эффективности технологической подготовки производства деталей и узлов ракетно-космической техники : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зайцев Алексей Михайлович, 2016. – 168 с. – Текст : непосредственный.
12. Кривонос, Е. В. Обоснование схемы фрезерования вафельного фона / Е. В. Кривонос. – DOI 10.25206/2588-0373-2021-5-3-83-90. – Текст : непосредственный // *Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. – 2021. – Т. 5, № 3. – С. 83–90.
13. Шачнев, С. Ю. Разработка методов повышения эффективности технологии механической обработки деталей оболочкового типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей : специальность 05.03.0105.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шачнев Сергей Юрьевич. – Москва, 2009. – 178 с. – Текст : непосредственный.
14. Зайцев, А. М. Оптимизация режимов резания при фрезеровании карманов обечайки с вафельной конструкцией / А. М. Зайцев, С. Ю. Шачнев, С. В. Грубый. – DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-14-23. – Текст : непосредственный // *Космическая техника и технологии*. – 2020. – № 3 (30). – С. 14–23.
15. Zheng, E. Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system / E. Zheng, X. Zhou. – DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2013.11.015. – Текст : непосредственный // *Mechanism and Machine Theory*. – 2014. – Vol. 74. – P. 10–30.
16. Михрютин, В. В. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов / В. В. Михрютин, М. А. Шерстобитов. – Текст : непосредственный // *Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева*. – 2012. – № 2 (23). – С. 279–284.
17. Научно-технические разработки ОКБ-23 - КБ «Салют», Выпуск 1. – Москва : Воздушный транспорт, 2006. – 720 с. – ISBN 5-88821-065-x. – Текст : непосредственный.

References

1. Mikhryutin, V. V., & Sherstobitov, M. A. (2012). Metody mekhanicheskoy obrabotki listovykh obshivok planera samoletov. *Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva*, (2(23)), pp. 279-284. (In Russian).
2. Pisarenko, A. A., & Kovalev, A. M. (2018). Mekhanoobratyvyayushchiy tsentr modeli SVO-3500 dlya formirovaniya vafel'nogo fona na krupnogabaritnykh konstruktsiyakh izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki. *Vestnik NPO Tekhnomash*, (2(6)), pp. 86-90. (In Russian).
3. Lizin, V. T., & Pyatkin, V. A. (1976). Proektirovanie tonkostennykh konstruktsiy. Moscow, Mashinostroenie Publ., 408 p. (In Russian).
4. Batrutdinov, R. G., & Sysoev, S. K. (2011). Tekhnologiya izgotovleniya vafel'nogo fona v obechaykakh letatel'nykh apparatov. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki, 1(7), pp. 7-8. (In Russian).
5. Artobolevskiy, I. I. (1975). Teoriya mekhanizmov i mashin. – Moscow, Nauka Publ., 640 p. (In Russian).
6. Dvornikov, L. T., & Bol'shakov, N. S. (2008). Teoriya krivoshipno-polzunnykh mekhanizmov : monografiya. – Novokuznetsk, NPF Publ., 138 p. (In Russian).
7. Belov, I. V., Semenov, D. V., & Belov, A. A. (2023). Crank-slide mechanism with two connecting rods. Original'nye issledovaniya, 13(8), pp. 20-27. (In Russian).
8. Chen, Yu., Sun, Yu., & Yang, D. (2017). Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(1), pp. 75-85. (In English). DOI 10.1007/s12206-016-1209-z.
9. Ha, J.-L., Fung, R.-F., Chen, K.-Yu., & Hsien, Sh.-Ch. (2006). Dynamic modeling and identification of a slider-crank mechanism. *Journal of Sound and Vibration*, 289(4), pp. 1019-1044. (In English). DOI 10.1016/j.jsv.2005.03.011.

10. Ibaraki, S., & Shimizu, T. (2010). A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes. *Precision Engineering*, 34(4), pp. 675-682. (In English). DOI 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001.
11. Zaitsev, A. M. (2016). Razrabotka napravleniy povysheniya effektivnosti tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva detaley i uzlov raketno-kosmicheskoy tekhniki: Diss. kand. tekhn. nauk. 168 p. (In Russian).
12. Krivonos, E. V. (2021). Justification scheme for milling waffle background. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-rocket and Power Engineering*, 5(3), pp. 83-90. (In Russian). DOI 10.25206/2588-0373-2021-5-3-83-90
13. Shachnev, S. Yu. (2009). Razrabotka metodov povysheniya effektivnosti tekhnologii mekhanicheskoy obrabotki detaley obolochkovogo tipa iz titanovykh splavov i martensitnostareyushchikh staley: Diss. kand. tekhn. nauk. 178 p. (In Russian).
14. Zaitsev, A. M., Shachnev, S. Yu., & Grubyi, S. V. (2020). Optimization of cutting modes when milling shell pockets with a wafer structure. *Space Engineering and Technology*, 3(30), pp. 14-23. (In Russian).
15. Zheng, E., & Zhou, X. (2014). Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system. *Mechanism and Machine Theory*, 74, pp. 10-30. (In English). DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2013.11.015.
16. Mikhryutin, V. V., & Sherstobitov, M. A. (2012). Metody mekhanicheskoy obrabotki listovykh obshivok planera samoletov. *Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva*, 2(23), pp. 279-284. (In Russian).
17. Bahvalov, Yu. O. (eds). (2006). *Nauchno-tekhnicheskie razrabotki OKB-23 - KB "Salyut"*. Issue 1. Moscow, *Vozdushnyy transport Publ.*, 720 p. (In Russian). ISBN 5-88821-065-kh.

Сведения об авторах

Дроздов Игорь Николаевич, начальник цеха АО НПЦ «Прогресс», e-mail: ceh2@progress-omsk.ru

Попов Андрей Юрьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры металлорежущих станков и инструментов, Омский государственный технический университет, e-mail: popov_a_u@list.ru. ORCID 0000-0002-7703-9283

Information about the authors

Igor N. Drozdov, foreman in JSC "Federal Research and Production Center "Progress", e-mail: ceh2@progress-omsk.ru

Andrey Yu. Popov, D. Sc. in Engineering, Professor at the Department of Metal Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University, e-mail: popov_a_u@list.ru. ORCID 0000-0002-7703-9283