



Определение основных технических параметров проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей

В.М. Свинин^{1✉}, А.В. Шутенков², Б.Б. Пономарев³

¹⁻³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – выработка и обоснование комплекса технико-экономических требований для подготовки в условиях импортозамещения задания на проектирование отечественной сверлильной машины с автоматической подачей. Объектами исследований для сравнения явились сверлильные машины с автоматической подачей, выпускаемые фирмами Atlas Copco, Desoutter и Recoules. По аналогии с существующими сверлильными машинами с автоматической подачей для проектируемой машины установлены ограничения предельный вес до 6 кг и габаритные размеры до 320x110x450 мм. Выбор электродвигателей приводов вращения шпинделя и его осевой подачи проведен на основе примера обработки твердосплавным сверлом отверстия диаметром 12 мм в типовом смешанном пакете толщиной 58 мм из листов стали марки 30ХГСА, полимерных композиционных материалов на основе углепластика, титанового сплава марки Вt6 и алюминиевого сплава марки 1933. Требуемая мощность электродвигателей определена с использованием режимов резания, выбранных из действующих справочников и данных, полученных при натурных испытаниях сверления смешанного пакета на станке DMC 635 V с динамометрической плитой Kistler Type 9123CQ05. Осциллограммы осевой силы и крутящего момента показали, что наибольшее силовое сопротивление возникает при сверлении титанового сплава. Рассчитаны и подтверждены следующие величины для проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей: требуемая мощность электрических приводов – 1,5 кВт (для привода подачи), 2,8 кВт (для привода вращения шпинделя). Максимальная требуемая частота вращения 1940 об/мин, максимальная требуемая подача 4,5 мм/об. Для дробления стружки и подавления возможных автоколебаний сверла предложено использовать создаваемые системой числового программного управления модуляции скоростей подачи и вращения шпинделя. В дальнейших исследованиях планируются изготовление опытного образца и испытание сверлильной машины с автоматической подачей, спроектированной по выданным рекомендациям.

Ключевые слова: сверлильная машина с автоматической подачей, смешанный пакет, технические параметры, Г- и Т-образная компоновка, пневматический и электрический привод, режимы и мощность резания

Благодарности. Исследование выполнено в рамках стратегического проекта ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» i.DIT – Байкальский центр цифровых производственных технологий (Программа «Приоритет 2030»).

Для цитирования: Свинин В.М., Шутенков А.В., Пономарев Б.Б. Определение основных технических параметров проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 224–237. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-224-237>. EDN: DQWDDT.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Main technical parameters for designing a new self-feed drilling machine

Valery M. Svinin^{1✉}, Anton V. Shutenkov², Boris B. Ponomarev³

¹⁻³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim is to develop and substantiate a complex of technical and economic requirements for the design of a self-feed drilling machine produced in the Russian Federation, which is particularly relevant in the context of import substitution. The study considers self-feed drilling machines produced by Atlas Copco, Desoutter and Recoules as references to match their performance and specifications. By analogy with these machines, the limiting weight and overall dimensions of the developed machine should be up to 6 kg and 320x110x450 mm,

respectively. The selection of motors for spindle rotation and axial feed is carried out by drilling a hole with a diameter of 12 mm in a mixed 58 mm thick stack using a carbide drill. This stack includes steel sheets (30KhGSA grade), polymer composite materials (carbon fibre-based), titanium alloy (Vt6 grade) and aluminium alloy (1933 grade). The required power for the electric drives was determined using cutting conditions specified in reference manuals and by drilling tests of a mixed stack carried out using a DMC 635 V machine equipped with a Kistler 9123CQ05 plate dynamometer. Oscillograms of axial force and torque showed that the highest resistance occurs when drilling the titanium alloy. The following specifications were calculated and confirmed for the projected self-feed drilling machine: the required power for the electric drives is 1.5 kW for the feed drive and 2.8 kW for the spindle rotation drive. The maximum required rotation speed is 1940 rpm, and the maximum required feed rate is 4.5 mm/rev. In order to grind chips and suppress potential auto-oscillations of the drill, it is recommended that the modulations of the feed and spindle rotation speeds created by a computer numerical control system be used. Future research will involve the production and testing of a prototype self-feed drilling machine, designed in accordance with the provided recommendations.

Keywords: automatic feed drilling machine, mixed package, specifications, L- and T-shaped design, pneumatic and electric drive, cutting modes and power

Acknowledgements. The work presented in the article is implemented under the strategic project of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Irkutsk National Research Technical University” i.DIT – Baikal Center for Digital Production Technologies (Priority 2030 Program).

For citation: Svinin V.M., Shutenkov A.V., Пономарев Б.Б. Main technical parameters for designing a new self-feed drilling machine. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):224-237. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-224-237>. EDN: DQWDDT.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в конструкциях несущих элементов летательных аппаратов (ЛА), например, крыльях, стали широко применять смешанные пакеты листов из разнородных авиационных материалов: алюминиевых и титановых сплавов, стали и углепластика [1]. При относительно небольшой массе эти пакеты обеспечивают высокую нагрузочную способность несущих элементов. Стыковку узлов, изготовленных из смешанных пакетов, выполняют обычно посредством многорядного болтового или заклепочного соединений. В качестве примера можно привести соединение центроплана ЛА с консолью крыла. Для обеспечения требуемой точности взаимного расположения соединяемых узлов разделку отверстий под болты производят на сборочном участке, ограниченная площадь которого не позволяет разместить крупногабаритное металлорежущее оборудование. В авиастроении на начальном этапе использования смешанных пакетов отверстия в них сверлили и разделявали при помощи ручных пневматических дреелей [2]. При этом качество получаемых отверстий полностью зависело от квалификации рабочего. При ручной подаче неравномерность осевого усилия повышала шероховатость обработанной поверхности [3] и приводила

к расслаиванию углепластика, входящего в состав пакета [4]. Высокий уровень брака при выполнении сверлильных операций приводил к увеличению времени сборки узлов и повышал себестоимость изготовления ЛА [5]. Для устранения указанных недостатков был создан новый, более технологичный тип ручного инструмента – сверлильная машина с автоматической подачей (СМАП)⁴. Применение этого инструмента позволило частично автоматизировать процесс обработки отверстий в смешанных пакетах на этапе стапельной сборки и снизить количество бракованных изделий. Перед сверлением СМАП закрепляют на смешанном пакете через кондуктор при помощи байонетного механизма. Сам кондуктор предварительно устанавливают на обрабатываемую поверхность с использованием болтов [6].

В отечественном авиастроении до сих пор используют импортные СМАП. Их поставка в Россию от зарубежных производителей в настоящее время ограничена. Этим объясняется острая потребность в создании отечественной конструкции СМАП, не уступающей импортным аналогам по техническим возможностям. Целью настоящей работы являются выработка и обоснование комплекса технико-экономических требований для подготовки в условиях импортозамещения

⁴Каталог фирмы Desoutter. Инструмент и решения для аэрокосмической промышленности. 2017. С. 18–21. Режим доступа: [https://www.desouttertools.com/uploads/documents/5b991104c00d8_Инструмент%20и%20решения%20для%20аэрокосмической%20промышленности%20\(Русский\).pdf](https://www.desouttertools.com/uploads/documents/5b991104c00d8_Инструмент%20и%20решения%20для%20аэрокосмической%20промышленности%20(Русский).pdf) (дата обращения: 16.01.2024).

задания на проектирование отечественной СМАП инструмента.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ СВЕРЛИЛЬНЫХ МАШИН С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДАЧЕЙ

СМАП представляют собой компактные переносные устройства, используемые преимущественно в авиастроении для обработки отверстий диаметром от 6 до 36 мм (чаще всего от 8 до 16 мм) в смешанных пакетах. К их основным техническим характеристикам можно отнести следующие: компоновку, тип привода, габаритные размеры, массу, потребляемую мощность, диапазоны частоты вращения инструмента и его осевой подачи, возможности удаления стружки и подавления вибраций инструмента [7]. Лидирующи-

ми производителями таких устройств являются фирмы Atlas Copco (Швеция), Desoutter (США), Recoules (Франция) и Lubbering (Германия). Внешний вид сверлильных машин представлен на рис. 1, а технические характеристики трех наиболее распространенных моделей приведены в табл. 1.

Все СМАП (см. рис. 1) имеют отчетливо выраженную Г- или Т-образную компоновку, включающую утонченную шпиндельную часть, приводную часть и компактное цанговое или байонетное крепление на кондукторе. Именно Т-образная форма машины позволяет размещать ее в стесненном пространстве собираемых узлов, а вынесенная рукоятка обеспечивает без затруднений возможность работы оператора. Пример закрепления СМАП через кондуктор для обработки

Разновидность СМАП по способу управления	
Пневматические	Электрические
Производители: Atlas Copco  Recoules  Desoutter  Lubbering 	Производители: Desoutter  Lubbering 

Рис. 1. Внешний вид и компоновка наиболее распространенных сверлильных машин с автоматической подачей^{5,6} [6]

Fig. 1. An image and configuration of the most common drilling machines with the automatic feed^{5,6} [6]

⁵Каталог фирмы Atlas Copco Industrial tools and solutions. 2016. С. 284–286. Режим доступа: <https://pdf.directindustry.com/ru/pdf-en/atlas-copco-tools/atlas-copco-industrial-tools-solutions-2016/8006-656778.html#open1824096> (дата обращения: 19.01.2024).

⁶Каталог фирмы Recoules. Материалы для сборки Авиационной техники Инструменты для Аэрокосмической промышленности. 2007. С. 5–26. Режим доступа: <https://www.technisource.co.uk/wp-content/themes/technisource/assets/Recoules-Catalogue.pdf> (дата обращения: 19.01.2024).

Таблица 1. Технические характеристики наиболее распространенных и вновь проектируемых сверлильных машин с автоматической подачей ^{5,6} [6]

Table 1. Specifications of the most common and newly designed drilling machines with the automatic feed ^{5,6} [6]

№	Фирма-производитель	Модель СМАП	Диаметры обрабатываемых отверстий, мм	Масса, кг	Габаритные размеры (длина x ширина x высота), мм	Диапазон частот вращения, об/мин	Диапазон подачи, мм/об	Мощность привода, кВт
1	Atlas Copco	PFD-1500	8–16	5,5	320x110x450	38–2360 (ступенчатое регулирование)	0,023–0,33 (ступенчатое регулирование)	1,5
2	Desoutter	Evo Seti-Tec ST 2200	8–16	4,2	350x80x400	131–2195 (бесступенчатое регулирование)	0,032–0,33 (бесступенчатое регулирование)	2,8
3	Recoules	20932	6–10	2,1	120x80x320	400–1400 (ступенчатое регулирование)	0,02–0,5 (ступенчатое регулирование)	0,75
4	СМАП ИР-НИТУ	СМАП-01	8–16	Не более 6 кг	320x110x450	0–5820 (бесступенчатое регулирование)	0–4,5 (бесступенчатое регулирование)	2,8

отверстий в труднодоступном месте показан на рис. 2.

Из-за различия высот обрабатываемых узлов (см. рис. 2, размер 395 max*) длина СМАП может быть различной. Это накладывает ограничение на толщину обрабатываемого смешанного пакета. В случае, когда обработка пакета невозможна при стандарт-

ной конфигурации СМАП, принято применять сменные «носовые» части, закрепляемые в кондукторе (рис. 3).

На практике наибольшее применение получили СМАП с пневматическим приводом. Одним из условий их использования является требование по электробезопасности на авиационных предприятиях, а также доступность в подключении питания от любой воздушной магистрали. Помимо этого, пневматический инструмент имеет малый вес, безопасен в обслуживании, прост в эксплуатации и позволяет создавать достаточный крутящий момент в ходе механической обработки. Безопасность использования пневматической СМАП достигается за счет низкого давления воздуха в системе (до 10 атм.). Достаточный крутящий момент обеспечивается расходной характеристикой и точным исполнением приводной лопасти.

Вместе с тем пневматические СМАП имеют ряд недостатков. Первый и основной недостаток – отсутствие бесступенчатого переключения и регулирования скоростей вращения и подачи инструмента. Настройка режимов резания на пневматических СМАП осуществляется путем замены редуктора, способного обеспечить только определенные параметры режимов резания в соответствии со своим передаточным числом⁵. Такое конструктивное решение накладывает определенные ограничения в выборе наиболее производительных режимов резания, а также приводит к удорожанию комплекта оборудования.

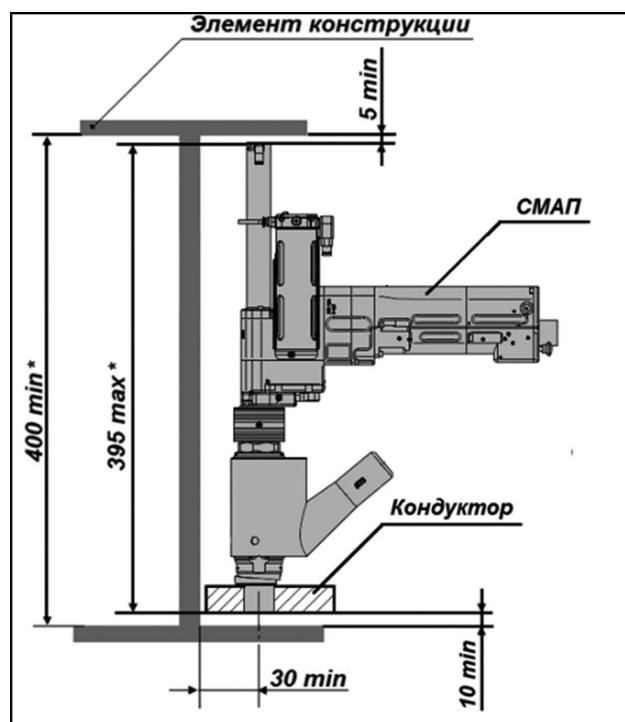


Рис. 2. Пример установки сверлильной машины с автоматической подачей модели PDF-1500 для обработки отверстий в труднодоступном месте⁶

Fig. 2. A setup example of a PDF-1500 drilling machine for hole processing in hard-to-reach places⁶

Вторым существенным недостатком пневматических СМАП является отсутствие управления по обратной связи. Из-за аналоговой природы управляющего сигнала пневматическая СМАП не способна адаптивно изменять режимы резания в процессе изготовления отверстий. Таким образом, при обработке смешанных пакетов с помощью пневматических СМАП оператор вынужден выбирать режимы резания по наиболее труднообрабатываемому материалу, занижая производительность механообработки в несколько раз [8].

Как известно, электрический привод в полной мере позволяет реализовать процесс регулирования момента на выходном звене механизма с элементами адаптации к условиям обработки. Поэтому в настоящее время ряд заказчиков и производителей считает наиболее перспективным применение в СМАП электрического привода (ЭСМАП). Особенность таких сверлильных машин заключается в возможности управления сигналом на основе обратной связи, обеспечивающей плавное и бесступенчатое переключение частоты вращения и подачи. Данный подход в управлении снижает количество требуемых редукционных блоков в конструкции машины, оставляя только необходимые, создающие достаточный крутящий момент при резании труднообрабатываемых материалов.

Целесообразность применения ЭСМАП при обработке отверстий в смешанных пакетах подтверждают результаты исследова-

ния, представленные в работе [9], основанные на сопоставлении условий обработки разнородных материалов, входящих в смешанный пакет. Наибольшая эффективность обработки достигается за счет возможности электропривода поддерживать рациональные режимы резания для каждого отдельного материала в пакете, тем самым сокращая суммарное время обработки отверстий и обеспечивая их качество.

Электрические мотор-редукторы по сравнению с пневматическими могут развивать больший по величине крутящий момент при равных массогабаритных характеристиках. Именно мощностная характеристика электрических СМАП является ключевой при проектировании и разработке российского аналога. Она определяет габариты, массу, мощность, а значит, и предельные крутящие моменты и, как следствие, возможность обработки определенных типов материалов.

Вес существующих сверлильных машин не превышает 5,5 кг (см. табл. 1). Для обеспечения мобильности и удобства эксплуатации вновь проектируемой машины ее допустимый вес по требованию производства не должен превышать 6 кг. В качестве предельных габаритов Т-образной компоновки машины предложено ориентироваться на размеры СМАП модели PDF-1500: 320x110x450 мм. По аналогии с моделями PDF-1500 и Evo Seti-Tec ST 2200 создаваемая машина должна обеспечивать обработку отверстий в смешанных пакетах в диапазоне диаметров от 8 до 16 мм.



Рис. 3. Виды сменных носовиков для сверлильной машины с автоматической подачей фирмы Desoutter
Fig. 3. Types of removable nose pads for Desoutter drilling machine with the automatic feed

Диапазоны частоты вращения шпинделя и его осевой подачи определяются требуемыми при сверлении отверстий режимами резания и возможностью их реализации приводом сверлильной машины.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ И ПОДАЧИ

Входящие в состав смешанного пакета разнородные конструкционные и композитные материалы требуют разных режимов механической обработки. Приводы сверлильной машины должны обеспечить при обработке каждого слоя пакета рациональные значения подачи, скорости и мощности резания. Определение требуемой мощности привода проектируемой сверлильной машины проведено для типового смешанного пакета, состоящего из титанового сплава марки Вt6 ГОСТ 19807-91, алюминиевого авиационного сплава марки 1933 ОСТ 1 90073-85, полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углепластика и легированной стали марки 30ХГСА ГОСТ 4543-71.

Для назначения режимов резания были использованы справочники^{7,8}, а также ре-

жимы резания, полученные опытным путем [10]. Принятый диаметр отверстия 12 мм соответствует середине диапазона диаметров отверстий, обрабатываемых с помощью СМАП (см. табл. 1). Режимы резания представлены в табл. 2.

На основании приведенных режимов резания можно сделать вывод о том, что для разрабатываемой ЭСМАП необходим двигатель привода главного движения мощностью не менее 9 кВт (см. табл. 2, режимы резания для 1933 по литературному источнику⁸). Однако применение двигателя такой мощности в конструкции ЭСМАП не позволит использовать ее в качестве ручного компактного инструмента из-за большой массы устройства и габаритных размеров. Параметр массы является определяющим и ограничен санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами СанПиН 2.2.2.540-96⁹, согласно которым разрешенная масса любого ручного инструмента не должна превышать 7 кг.

Для уточнения требований по массоинерционным характеристикам устройства и режимам обработки было решено определить силовую нагрузку и мощность резания при

Таблица 2. Режимы резания материалов в составе смешанного пакета

Table 2. Cutting modes of mixed package materials

№	Обрабатываемый материал	Частота вращения n, об/мин	Подача f, мм/об	Момент резания M, Н·м	Мощность резания N, кВт
Литературный источник ⁷					
1	Вt6	248,3	0,09	16,12	0,4
2	1933	1814,4	0,22	35,9	6,7
3	30ХГСА	300	0,24	16,2	0,5
4	ПКМ (углепластик)	–	–	–	–
Литературный источник ⁸					
1	Вt6	1029,2	0,115	6,85	0,74
2	1933	5782,6	0,317	14,6	8,82
3	30ХГСА	2602,2	0,335	21	5,71
4	ПКМ (углепластик)	–	–	–	–
Литературный источник [10]					
1	Вt6	270	0,023	–	1,5
2	1933	1200	0,1	–	1,5
3	30ХГСА	270	0,023	–	1,5
4	ПКМ (углепластик)	600	0,023	–	1,5

⁷Баранчиков В.И., Жаринов А.В., Юдина Н.Д., Садыхов А.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.

⁸Каталог фирмы Sandvik Coromant. Вращающиеся инструменты. Сверление. 2012. С. 8–26. Режим доступа: <https://mirstan.ru/files/catalogs/sandvik/Sverlenie.pdf> (дата обращения 16.01.2024).

⁹СанПиН 2.2.2.540-96. 2.2.2. Технологические процессы, сырье, материалы и оборудование, рабочий инструмент. Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ. Санитарные правила и нормы. Утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 04.07.1996. № 12.

сверлении смешанного пакета опытным путем на режимах резания по рекомендациям, представленным в работе⁸. Была проведена обработка серии отверстий в пакете общей толщиной 58 мм твердосплавным сверлом, изготовленным на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО ОАК «Яковлев». В состав типового для авиастроения смешанного пакета в последовательности их расположения вошли следующие материалы: 30ХГСА, ПКМ, Вт6 и 1933. Основные конструктивно-геометрические параметры инструмента имели значения: диаметр 12 мм, общая длина 158 мм, длина режущей части 120 мм, угол при вершине 140° , угол наклона винтовых стружечных канавок 30° . Главные режущие лезвия на уголках сверла характеризуются задним углом 5° и передним углом 20° .

Закрепление режущего инструмента осуществляли с помощью гидромеханического патрона 392.272HMD-40 20 085 через цанговый зажим CG 20 LOT 117 с диаметром 12 мм. Вариант закрепления был выбран для имитации закрепления сверла в системе СМАП и обеспечения подобия жесткости технологической системы во время резания. Проведенный модальный анализ подтвердил одинаковую жесткость закрепления сверла как в станке, так и в СМАП.

Сверление сквозных отверстий проводили на вертикально-фрезернообрабатывающем центре DMC 635 V с системой ЧПУ Siemens 840D при частоте вращения шпинделя $n = 1029$ об/мин и осевой подаче $f = 0,115$ мм/об. Осевую силу резания и крутящий момент ре-

гистрировали с помощью динамометрической плиты Kistler Type 9123CQ05, а обработку полученных данных выполняли с использованием программного комплекса DynoWare компании Kistler. Экспериментальная установка представлена на рис. 4.



Рис. 4. Экспериментальная установка для определения осевой силы резания и крутящего момента при обработке смешанного пакета

Fig. 4. Experimental setup to determine the axial cutting force and torque when mixed package processing

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

На рис. 5 и 6 представлены осциллограммы изменения соответственно осевой

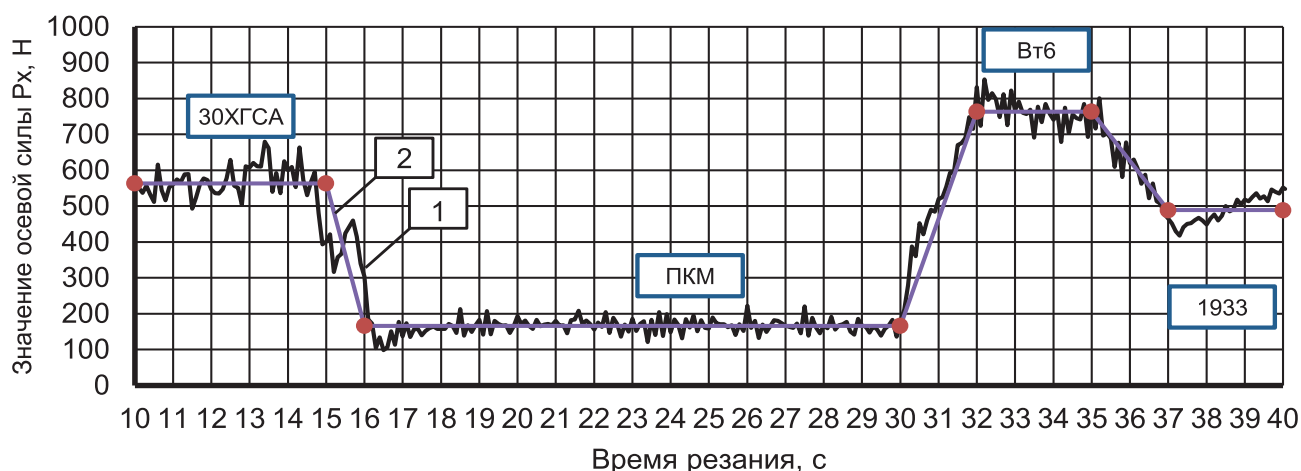


Рис. 5. Осциллограмма осевой силы P_x при сверлении отверстий в смешанном пакете (30ХГСА+ПКМ+Вт6+1933): 1 – мгновенное значение осевой силы P_x ; 2 – среднее значение осевой силы P_x

Fig. 5. Oscillogram of the axial force P_x when drilling holes in a mixed package (30KhGSA+PCM+Vt6+1933): 1 – instantaneous value of the axial force P_x ; 2 – average value of the axial force P_x

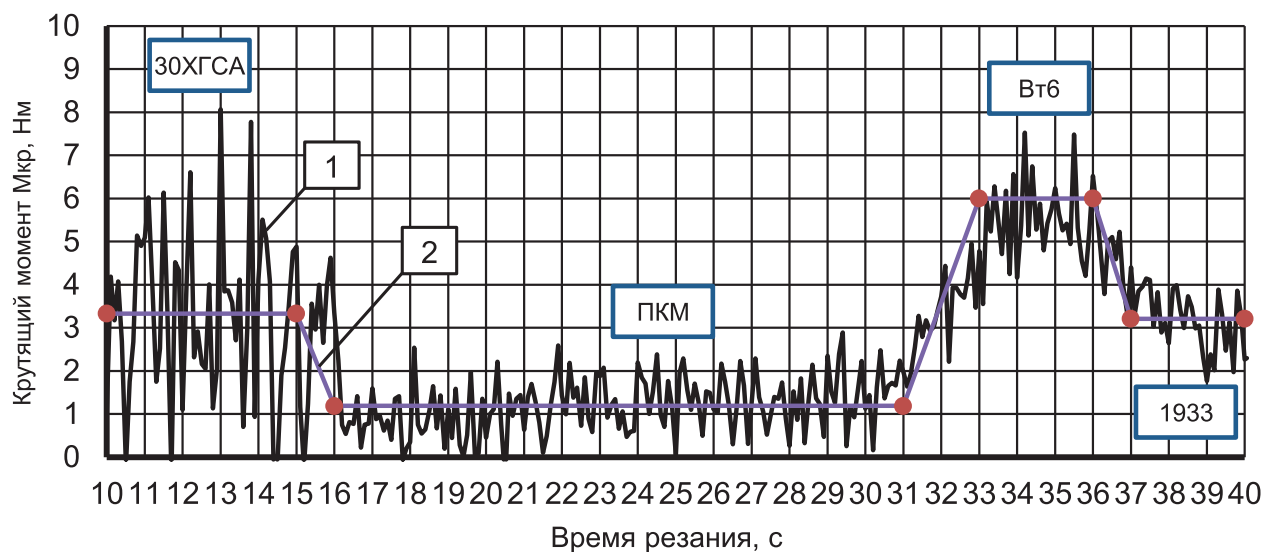


Рис. 6. Осциллограмма крутящего момента $M_{кр}$ при сверлении отверстий в смешанном пакете (30ХГСА+ПКМ+Вт6+1933): 1 – мгновенное значение крутящего момента $M_{кр}$; 2 – среднее значение крутящего момента $M_{кр}$

Fig. 6. Oscillogram of the $M_{кр}$ torque when drilling holes in the mixed package (30KHGSA+PCM+Vt6+1933): 1 – instantaneous value of the $M_{кр}$ torque; 2 – average value of the $M_{кр}$ torque

составляющей силы резания P_x и крутящего момента $M_{кр}$ при сверлении смешанного пакета.

На рис. 5 можно видеть, что максимальное значение осевой силы P_x возникает во время обработки титанового сплава марки Вт6 и составляет 853,5 Н. При этом среднее значение этой силы равно 790 Н. При обработке стали 30ХГСА осевая сила меньше: 680 Н – максимальное значение и 600 Н – среднее. Наименьшее силовое сопротивление создает ПКМ: 210 Н – максимальная сила и 170 Н – средняя.

Изменение крутящего момента $M_{кр}$ при прохождении инструментом разных слоев пакета колеблется в значительном диапазоне (см. рис. 6). Его пиковое значение 8,1 Нм наблюдается во время обработки отверстия в легированной стали марки 30ХГСА при его среднем значении, равном лишь 4 Нм. При обработке же титанового сплава Вт6 наоборот: наибольшее значение составляет 7,5 Нм при значительном среднем значении, определяющем затрачиваемую на резание мощность, равно 6,15 Нм. Аналогично осевой силе P_x при обработке ПКМ изменяется крутящий момент $M_{кр}$, он минимален при 2,5 Нм – максимальном значении и 1,2 Нм – средним.

Таким образом, наибольшую мощность на преодоление сопротивления вращению инструмента и его осевому перемещению

нужно затратить во время сверления титанового сплава Вт6. Поэтому для расчета требуемой мощности приводов вращения и подачи выбраны средние значения крутящего момента $M_{кр}$ и осевой силы P_x , равные 6,15 Нм и 790 Н соответственно.

Необходимая мощность электрического двигателя для привода вращения проектируемой ЭСМАП определена по формулам¹⁰:

$$N_э = \frac{M_{кр} \cdot n}{9550 \cdot \eta}, \quad (1)$$

где $N_э$ – эффективная мощность резания, кВт; M – момент силы резания, Нм; n – частота вращения сверла, об/мин; $\eta = 0,9$ – КПД электродвигателя.

Таким образом, расчетная мощность для обработки отверстий диаметром 12 мм составляет для электрического привода вращения 0,74 кВт.

Потребная мощность электрического двигателя для привода подачи проектируемой ЭСМАП определена через осевое усилие P_x и рассчитана по формуле для винтового механизма¹¹:

$$M_{кр} = 0,5 \cdot P_x \cdot d \cdot tg \left(\frac{\alpha}{180 \cdot \pi} + \frac{\varphi}{180 \cdot \pi} \right), \quad (2)$$

где $M_{кр}$ – значение крутящего момента, рассчитанного через осевое усилие, Нмм; P_x – осевая сила, Н; $d = 16$ – средний диаметр резьбы винта, мм; $\alpha = 1,8$ – угол подъема

витка резьбы по среднему диаметру, град;
 $\varphi = 7,2$ – приведенный угол трения, град.

Угол подъема витка резьбы по среднему диаметру и приведенный угол трения приняты из¹⁰.

Подставив значения, произведем расчет:

$$M_{кр} = 0,5 \cdot 790 \cdot 16 \cdot tg \left(\frac{1,8}{180 \cdot \pi} + \frac{7,2}{180 \cdot \pi} \right) = \\ = 958 \text{ Нмм} = 0,96 \text{ Нм.}$$

Подставив рассчитанное значение крутящего момента в (1), потребляемая мощность составит 0,12 кВт.

Таким образом, на основании проведенных расчетов и натурного опыта можно сделать вывод о том, что максимальные силы резания и моменты при обработке смешанного пакета возникали в титановом сплаве марки Вt6.

Расчеты показали, что для привода вращения шпинделя минимальная необходимая мощность должна составлять не менее 0,74 кВт, а для привода подачи – не менее 0,12 кВт.

Анализ подходящих электродвигателей показал, что перспективным типом электрической машины для переносного инструмента является бесколлекторный двигатель постоянного тока BLDC (англ. – Brushless DC electric motor), чаще всего применяемый в беспилотных авиационных системах (БАС) [11]. Исходя из этого, был проведен поиск наиболее энергоемких электродвигателей с наилучшим соотношением удельного показателя мощности на единицу массы (Ватт на килограмм), соответствующих рассчитанным выше характеристикам. В табл. 3 приведены основные характеристики двигателей этой конструкции, выбранные для привода вращения и привода подачи, проектируемой ЭСМАП.

Таким образом, для привода подачи выбран двигатель марки AT2826 KV1100, а для привода вращения – электродвигатель марки U11 II KV120, выпускаемые фирмой T-motor (Китай).

Завышенные по сравнению с расчетными мощностные характеристики обоснованы запасом по крутящему моменту. Модульный принцип проектируемой ЭСМАП позволит при необходимости обрабатывать отверстия больших диаметров, не меняя электрические приводы, заменяя только сменный носовик, подходящий для необходимого диаметра сверла.

Выбранные электрические двигатели, обладающие большей относительно расчетной мощностью, отвечают требованиям к габаритам и общей массе, проектируемой ЭСМАП, но имеют высокую частоту вращения ротора, что создает сложность в регулировании этого параметра до необходимого рабочего диапазона. В конструкции разрабатываемой ЭСМАП дополнительно должны быть установлены редукторные блоки с передаточными отношениями $i = 50:1$ для привода подачи и $i = 5:1$ для привода частоты вращения.

Таким образом, применив указанные редукторные блоки, проектируемая ЭСМАП должна иметь следующие характеристики: номинальная частота вращения привода шпинделя составит 1940 об/мин и номинальная частота вращения привода подачи – 90 об/мин. При величине шага ходового винта 1 мм номинальное значение подачи будет 1,5 мм/об. С учетом возможностей регулирования частот вращения (по верхнему пределу в 3 раза больше от номинала и по нижнему пределу до 0) имеем следующие характеристики привода: диапазон частот вращения от 0 до 5820 об/мин, диапазон подач от 0 до 4,5 мм/об. (см. табл. 1).

Таблица 3. Характеристики бесколлекторных двигателей постоянного тока BLDC

Table 3. Characteristics of BLDC brushless DC electric motors

№	Марка электродвигателя	Напряжение, В	Ток номинальный, А	Момент номинальный, Нм	Мощность номинальная, кВт	Мощность максимальная, Нм	Частота вращения, об/мин	Энергоемкость, Вт/кг
1	AT2826 KV1100	48	59	8,6	1,5	2,5	9700	272,7
2	U11 II KV120	48	57,3	10,2	2,8	4	4500	411,8

¹⁰Кириленко А.Л., Коновалов А.Б., Авакумов М.В. Кинематические расчеты приводов машин: метод. указ. 2-е изд., испр. СПб.: Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2011. 29 с.

¹¹Варганов В.О., Авакумов М.В., Колычев М.В., Гребенникова В.М., Романов В.А. Передача винт-гайка: учеб. пособ. СПб.: Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2015. 57 с.

ДРОБЛЕНИЕ СТРУЖКИ И ПОДАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ СВЕРЛА

Длина отверстий, образуемых в смешанных пакетах, достигает пяти и более диаметров. Поэтому их можно классифицировать как глубокие, при обработке которых часто возникает проблема удаления стружки. Для обеспечения гарантированного отвода стружки по каналам инструмента и исключения повреждения поверхности отверстия необходимо разделение сливной стружки на отдельные не связанные между собой фрагменты. Заточка стружкодробящих уступов на передней поверхности сверла весьма трудоемка и часто не обеспечивает желаемого результата. Лучше всего для этой цели подходит кинематическое дробление стружки путем наложения осевых или крутильных колебаний на инструмент. Для создания осевых колебаний сверла используют вибраторы разных типов: гидравлические [12], электродинамические [13], шариковые [14], эксцентриковые¹², магнитные [15], автоколебательные вибропатроны [16] и другие механизмы. Однако многие из перечисленных устройств имеют существенные размеры и загромаждают зону резания. С целью достижения максимальной компактности конструкции СМАП, необходимой в стесненных условиях сборочного стапеля, осевые колебания инструмента предполагается создавать путем модуляции скорости подачи, реализуемой системой программного управления. В этом случае цепь движения подачи должна включать в себя управляемый системой ЧПУ электродвигатель, редуктор и кинематическую пару гайка – винт.

Осевые колебания сверла создают дополнительную силовую нагрузку на его главные задние поверхности, способствуя ускоренному износу инструмента. Поэтому для снижения динамической нагрузки частота и амплитуда его колебаний должны быть выбраны минимально возможными из условия обеспечения надежного дробления стружки. На рис. 7 приведено взаимное расположение траекторий колебательного движения главных режущих лезвий спирального сверла при разном количестве

осевых колебаний, накладываемых на инструмент за один его оборот. Для гарантированного дробления стружки толщина срезаемого слоя должна периодически уменьшаться до нуля. С этой целью амплитуду A осевых колебаний задают равной половине толщины S_r срезаемого слоя или четверти подачи на оборот: $A = S_r/2 = S_o/4$. При четном числе колебаний за оборот (2, 4, 6... и т.д.) вибрационные траектории лезвий синфазны между собой, и толщина срезаемого слоя остается постоянной. Если число колебаний за один оборот принимает нечетное значение (1, 3, 5... и т.д.), то траектории противофазны, и толщина срезаемого слоя пульсирует от нуля до S_o . При этом происходит надежное разделение стружки на отдельные фрагменты. По данным работы [11] для дробления стружки достаточно до 5 осевых колебаний сверла за оборот. Оптимальные значения частоты и амплитуды колебаний могут быть установлены опытным путем для каждого конкретного случая обработки.

Спиральные сверла, используемые для образования отверстий глубиной пять и более диаметров, обладают низкой конструктивной жесткостью в изгибном, крутильном и осевом направлениях, что может провоцировать возбуждение регенеративных автоколебаний при их работе [17]. Автоколебания ускоряют износ инструмента, ухудшают точность и качество обработанной поверхности, и поэтому крайне нежелательны. Для подавления автоколебаний в СМАП может быть использована модуляция скорости резания путем наложения низкочастотных крутильных колебаний на главное движение резания. Этот способ универсален и прост в реализации. Применительно к сверлению эффективность такого подхода доказана экспериментально [18]. В СМАП кинематическая цепь главного движения (подобно движению подачи) должна содержать управляемый системой ЧПУ электродвигатель и редуктор. Кроме подавления автоколебаний, модуляция скорости резания может быть использована и для дробления сливной стружки при сверлении [19, 20].

¹²А.с. № 407660, СССР, В23В 47/04, В23В 5/02. Виброшпиндель / В.С. Мисевич. № 1710833/25-8. Заявл. 01.11.1971; опубл. 10.12.1973. Бюл. № 47.

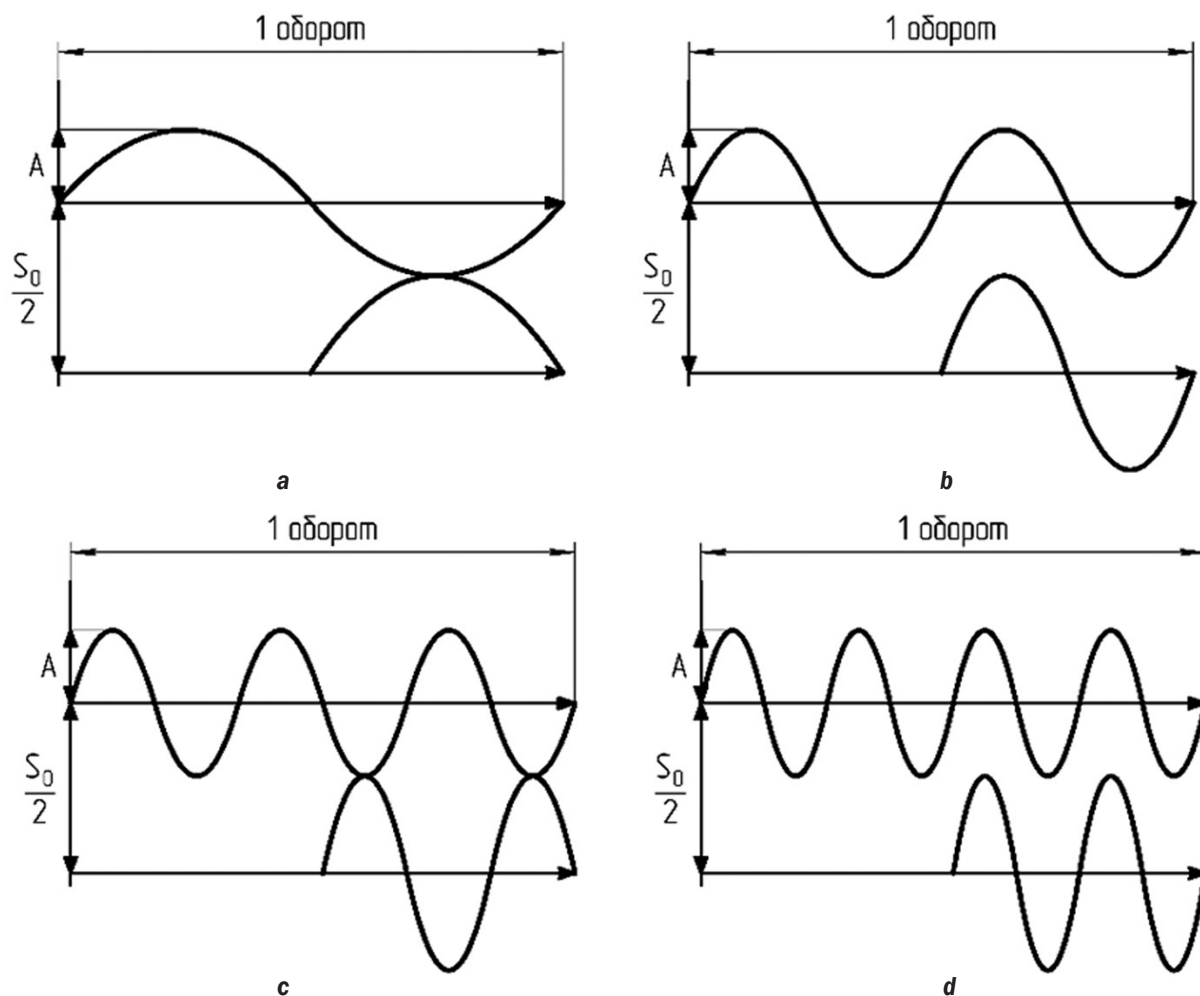


Рис. 7. Развертки вибрационных следов последовательных проходов лезвий спирального сверла при резании с разным количеством осевых колебаний за один оборот инструмента: а – одно колебание; б – два колебания; в – три колебания; д – четыре колебания

Fig. 7. Scans of vibration traces of successive passes of the auger bit blades when cutting with a different number of axial vibrations per tool revolution: а – one oscillation; б – two oscillations; в – three oscillations; д – four oscillations

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проведенного исследования является предложенный перечень основных рекомендаций к техническому заданию на проектирование сверлильной машины с автоматической подачи. Наиболее предпочтителен для проектирования электрический тип сверлильной машины. ЭСМАП позволяет более эффективно вести обработку смешанных пакетов за счет минимизации затрат на переналадку оборудования и изменение режимов резания для каждого материала в смешанном пакете. Преимущество использования электрической СМАП заключается в возможности реализации программного управления законами движения (частотой вращения и подачи), применения модуляции скорости резания для обеспечения дробления стружки с последующей ее эвакуацией,

а также для использования в борьбе с вибрациями, возникающими при недостаточной жесткости системы во время обработки отверстий.

Наиболее предпочтительными диаметрами обработки являются диаметры в диапазоне от 8 до 16 мм. Масса проектируемой ЭСМАП не должна превышать 7 кг. Рекомендуемые габариты сверлильной машины (Длина х Ширина х Высота) должны быть не более 320х110х450 мм. Наиболее рациональна Т – образная компоновка сверлильной машины для работы в стесненных условиях стапельной сборки.

Расчетные и экспериментально полученные данные показывают, что для производительной обработки отверстий диаметром до 12 мм необходимо иметь электрический двигатель частоты вращения мощностью не

менее 1 кВт, а для двигателя подачи – не менее 0,5 кВт.

Выбранные электрические двигатели имеют двукратный запас по мощности, не повышая при этом габаритов и веса конструкции. Такой выбор позволит при необходимости обрабатывать отверстия большего диаметра.

В условиях глобальной конкуренции и внешнеэкономического санкционного давления развитие собственных технологий в авиастроении, включая производственное

оборудование, такое как ЭСМАП, является ключом к сохранению и укреплению позиций России на мировом рынке авиационной техники, а также к обеспечению стратегических интересов страны. В дальнейшем планируется изготовление и испытание ЭСМАП при обработке типовых смешанных пакетов, а также изучение эффективности модуляции скорости резания на формирование стружки и подавление вибраций с целью повышения технологичности обработки отверстий.

Список источников

1. Соколова О.Ф., Шарипова Д.Р. Композитные материалы в космической и авиационной промышленности // Проблемы и перспективы экономических отношений предприятий авиационного кластера: сб. науч. тр. VIII Всерос. науч. конф. (г. Ульяновск, 24–26 октября 2023 г.). Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2023. С. 15–18. EDN: AFLZLN.
2. Ширинкин В.В., Макаров В.Ф., Мешкас А.Е. Научометрическое исследование проблем сверления композиционных материалов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2015. Т. 1. С. 289–298. EDN: VRRBET.
3. Козочкин М.П., Мамотько А.И., Маслов А.Р. Исследование процесса сверления лонжерона лопасти винта из слоистого полимерного композита // Вестник Московского государственного технологического университета «Станкин». 2017. № 4. С. 68–72. EDN: ZUKBML.
4. Завацкая Т.В., Кротенко А.Е., Иванов Ю.Н. Сверление и контроль отверстий в пакетах «титановый сплав-углепластик» // Жизненный цикл конструкционных материалов: сб. тр. XII Всероссийской науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 6 июня 2022 г.). Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. С. 209–215. EDN: CVDQBN.
5. Чашин Н.С. Чистовая обработка отверстий в смешанных пакетах // Авиакосмические технологии (АКТ-2018): труды XIX Междунар. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Воронеж, 18–19 октября 2018 г.). Воронеж: ООО Фирма «Элист», 2018. С. 262–266. EDN: YXXZRJ.
6. Пикалов А.А., Чайников К.К. Применение специальной технологической оснастки и гибких сверлильных шаблонов для сверлильных машин с автоматической подачей режущего инструмента // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 1-2. С. 260–263. EDN: WLWZBD.
7. Свинин В.М., Шутенков А.В., Ястребов С.В. Анализ конструкций и технологических требований к сверлильным машинам с автоматической подачей для авиационного производства // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 16 мая 2023 г.). Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. С. 38–43.
8. Пашков А.Е., Иванов Ю.Н., Чашин Н.С., Иванова В.О. Оценка эффективности использования твердосплавного и алмазного инструмента для обработки отверстий в смешанных пакетах // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 4. С. 60–66. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-60-66>. EDN: ZWZWYV.
9. Стуров А.А. Повышение эффективности обработки отверстий в многослойных пакетах // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 1. С. 7. EDN: VRWXUB.
10. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н., Никонович В.В. Сухая чистовая обработка отверстий в смешанных пакетах ступенчатым инструментом // Проблемы механики современных машин: сб. тр. VIII Междунар. конф. (оз. Байкал, 4–9 июля 2022 г.). Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2022. С. 235–242. https://doi.org/10.53980/9785907599055_235. EDN: GYFXXF.
11. Вотинцева А.Б. Критерии выбора двигателя для беспилотного летательного аппарата // Молодой ученый. 2022. № 4. С. 45–47.
12. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. 350 с.
13. Пат. № 2412023, Российская Федерация, С2, В23В 35/00, В23В 45/16. Способ вибросверления с мелкодисперсным дроблением стружки / В.Н. Старов, А.В. Масленников, А.И. Барботько. № 2008148738/02. Заявл. 10.12.2008; опублик. 20.02.2011. Бюл. № 5.
14. Пат. № 1294498, СССР, В23В 47/04. Шариковый вибратор / Ю.В. Лебедев, Л.П. Лукьяненко. № 3915500/31-08. Заявл. 18.06.1985; опублик. 07.03.1987. Бюл. № 9.
15. Пат. № 1590213, СССР, В23В 47/04, В23В 25/02. Шпиндельный узел / К.М. Рагульскис, Й.Б. Гудонис, Б.Б. Стульпинас, В.В. Юренас. № 4429368/31-08. Заявл. 24.05.1988; опублик. 07.09.1990. Бюл. № 33.
16. Воронов С.А., Гуськов А.М., Иванов И.И., Барышева Д.В., Киселёв И.А. Существующие методы обеспечения низкочастотных вибраций инструмента с целью дробления стружки при сверлении глубоких отверстий // Наука и образование. 2014. № 12. С. 842–857. <https://doi.org/10.7463/1214.0748342>. EDN: TEVGVN.

17. Roukema J.C., Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation // International Journal of Machine and Tools Manufacture. 2007. Vol. 47. Iss. 9. P. 1455–1473. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005>.
18. Svinin V.M., Savilov A.V., Shutenkov A.V. Software spindle speed variation as method for chatter suppression in drilling // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 131–139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_15.
19. Рызванович А.Я., Генералов В.А., Капралов В.В. Вибрационная обработка с крутильными колебаниями шпинделя // Вестник машиностроения. 2016. № 6. С. 31–35. EDN: WEZRFV.
20. Рызванович А.Я., Генералов В.А. Повышение качества сверления отверстий малого диаметра применением вибрации // Вестник машиностроения. 2022. № 6. С. 78–83. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-6-78-83>. EDN: RIMAEI.

References

1. Sokolova O.F., Sharipova D.R. Composite materials in the space and aviation industries. *Problemy i perspektivy ekonomicheskikh otnoshenij predpriyatij aviacionnogo klastera: sbornik nauchnykh trudov VIII Vserossijskoj nauchnoj konferencii = Problems and prospects of economic relations of aviation cluster enterprises: collection of scientific works of the 8th All-Russian scientific conference*. 24–26 October 2023, Ulyanovsk. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University; 2023, p. 15-18. EDN: AFLZLN. (In Russ.).
2. Shirinkin V.V., Makarov V.F., Meshkas A.E. Scientometric study of the problems of drilling composite materials. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovacii*. 2015;1:289-298. (In Russ.). EDN: VRRBET.
3. Kozochkin M.P., Mamotko A.I., Maslov A.R. Study on drilling process of rotor blade spar layered polymer composite. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta "Stankin"*. 2017;4:68-72. (In Russ.). EDN: ZUKBML.
4. Zavatskaya T.V., Krotenko A.E., Ivanov Yu.N. Drilling and monitoring of holes in titanium alloy-carbon plastic packages. In: *Zhiznennyj cikl konstrukcionnykh materialov: sbornik trudov XII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Life cycle of structural materials: collected works of the 12th All-Russian Scientific and Technical conference*. 6 June 2022, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2022, p. 209-215. (In Russ.). EDN: CVDQBN.
5. Chashchin N.S. Handling of holes in hubrid stack. In: *Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2018): trudy XIX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov = Aerospace technologies (AST-2018): proceedings of the 19th International scientific and technical conference and school for young scientists, postgraduate students and students*. 18–19 October 2018, Voronezh. Voronezh: OOO Firma "Elist"; 2018, p. 262-266. (In Russ.). EDN: YXXZRJ.
6. Pikalov A.A., Chainikov K.K. Special jigs and drilling templates for automated drilling units. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(1-2):260-263. (In Russ.). EDN: WLWZBD.
7. Svinin V.M., Shutenkov A.V., Yastrebov S.V. Analysis of designs and technological requirements for drilling machines with automatic feed for aircraft production. In: *Zhiznennyj cikl konstrukcionnykh materialov (ot polucheniya do utilizacii): materialy XIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Life cycle of structural materials (from production to disposal): materials of the 13th All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 16 May 2023, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2023, p. 38-43. (In Russ.).
8. Pashkov A.E., Ivanov Yu.N., Chashin N.S., Ivanova V.O. Efficiency evaluation of the use of carbide and diamond tool for processing holes in mixed packages. *Systems. Methods. Technologies*. 2017;4:60-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-60-66>. EDN: ZWZYV.
9. Sturov A.A. Effectiveness increase of hole-making operation in multilayer stacks. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016;1:7. (In Russ.). EDN: VRWXUB.
10. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N., Nikonovich V.V. Dry finishing of holes in mixed stack with step tools. In: *problemy mekhaniki sovremennykh mashin: sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoj konferencii = Problems of modern machine mechanics: collected articles of the 8th International conference*. 4–9 July 2022, Bajkal. Ulan-Ude: East Siberian State University of Technology and Management; 2022:235-242. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/9785907599055_235. EDN: GYFXXF.
11. Votintseva A.B. Engine selection criteria for an unmanned aerial vehicle. *Molodoj uchenyj*. 2022;4:45-47. (In Russ.).
12. Poduraev V.N. *Vibration cutting*. M.: Mashinostroenie; 1970, 350 p. (In Russ.).
13. Starov V.N., Maslennikov A.V., Barbot'ko A.I. *Method of vibration drilling with fine crushing of chips*. Patent RF, no. 2412023; 2011. (In Russ.).
14. Lebedev Yu.V., Lukyanenko L.P. *Ball vibrator*. Patent SSSR, no. 1294498; 1987. (In Russ.).
15. Ragul'skis K.M., Gudonis J.B., Stul'pinas B.B., Yurenas V.V. *Spindle unit*. Patent SSSR, no. 1590213; 1990. (In Russ.).
16. Voronov S.A., Gus'kov A.M., Ivanov I.I., Barysheva D.V., Kiselyov I.A. Existing methods providing low-frequency tool vibrations for chips crushing under deep hole drilling. *Nauka i obrazovanie*. 2014;12:842-857. (In Russ.). <https://doi.org/10.7463/1214.0748342>. EDN: TEVGVN.

17. Roukema J.C., Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. *International Journal of Machine and Tools Manufacture*. 2007;47(9):1455-1473. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005>.
18. Svinin V.M., Savilov A.V., Shutenkov A.V. Software spindle speed variation as method for chatter sup-pression in drilling. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020;131-139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_15.
19. Ryzvanovich A.Ya., Generalov V.A., Kapralov V.V. Vibration processing with spindle torsional vibrations. *Vestnik mashinostroeniya*. 2016;6:31-35. (In Russ.). EDN: WEZRFV.
20. Ryzvanovich A.Ya., Generalov V.A. Improving the quality of drilling holes of small diameter using vibration. *Vestnik mashinostroeniya*. 2022;6:78-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-6-78-83>. EDN: RIMAEL.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Свинин Валерий Михайлович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Технология и оборудования
машиностроительных производств»,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ svinin_vm@mail.ru

Шутенков Антон Владимирович,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
shutenkov@ex.istu.edu

Пonomarev Борис Борисович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Технология и оборудования
машиностроительных производств»,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
pusw@istu.edu

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery M. Svinin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology and
Equipment of Machine-Building Industries,
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ svinin_vm@mail.ru

Anton V. Shutenkov,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
shutenkov@ex.istu.edu

Boris B. Ponomarev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology and
Equipment of Machine-Building Industries,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
pusw@istu.edu

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный ва-
риант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.04.2024 г.; одобре-
на после рецензирования 28.05.2024 г.; принята к
публикации 30.05. 2024 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 20.04.2024; approved
after reviewing 28.05.2024; accepted for publication
30.05. 2024.