



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-1-38-51
УДК 621.914.1
EDN: DUABVN

Научная статья / Research article

Выбор оптимальных режимов резания с учетом качества обработанной поверхности детали на фрезерном станке Roland MDX-20

Д.Г. Алленов[✉], Н.А. Яковлева[✉], К.Б. Дейнова[✉],
Д.В. Данилов[✉], М.В. Азанов[✉]

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия
✉ allenov-dg@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 10 июля 2023 г.
Доработана: 22 ноября 2023 г.
Принята к публикации: 1 декабря 2023 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. Приведены результаты оптимизации процесса фрезерования на станке Roland MDX-20: эмпирически установлены максимально допустимые и оптимальные режимы резания деталей из пенопласта, твердого и мягкого модельных пластиков, древесины твердой породы. На первом этапе исследования изучен полный перечень типов стратегий для черновой и чистовой обработок, представленных в САМ-системе Modela Player 4 (MP4), в результате выбрана оптимальная для задуманного эксперимента (осуществлены 9 виртуальных тестов), за анализируемый параметр принято время обработки. Для понимания специфики работы на исследуемом станке и проверки пригодности использования параметров обработки и типа стратегии осуществлена тестовая обработка пенопласта. Основные критерии оптимизации — скорость, выраженная в виде времени обработки, и качество получаемой поверхности. На втором этапе исследования — эксперимент — описаны методы черновой обработки горизонтальных поверхностей 20×20 мм моделей, состоящих из усеченной пирамиды и полусферы, на фрезерном станке Roland MDX-20 с использованием MP4. В качестве режущих инструментов в обоих исследованиях применялись для черновой обработки цилиндрическая фреза Hanita 400305002 Ø6 мм, для чистовой — сферическая фреза Hanita 400103002 Ø3 мм. Установлены рекомендуемые режимы резания, позволяющие сократить время обработки деталей на 40–50 %, не ухудшая качества обрабатываемых поверхностей.

Ключевые слова: режимы резания, время обработки, типы стратегий обработки, скорость обработки, качество поверхности

Для цитирования

Алленов Д.Г., Яковлева Н.А., Дейнова К.Б., Данилов Д.В., Азанов М.В. Выбор оптимальных режимов резания с учетом качества обработанной поверхности детали на фрезерном станке Roland MDX-20 // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 1. С. 38–51. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-1-38-51>

The Choice of Optimal Cutting Conditions, Taking into Account the Quality of the Machined Surface of the Part on the Roland MDX-20 Milling Machine

Dmitry G. Allenov[✉], Nadezhda A. Yakovleva[✉], Kristina B. Deinova[✉],
Danila V. Danilov[✉], Matvey V. Azanov[✉]

RUDN University, Moscow, Russia

✉ allenov-dg@rudn.ru

Article history

Received: July 10, 2023

Revised: November 22, 2023

Accepted: December 1, 2023

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. The results of optimizing the milling process on the Roland MDX-20 machine are presented: the maximum allowable and optimal cutting conditions for parts made of foam, hard and soft modeling plastics, and hardwood are empirically established. At the first stage of the study, a complete list of types of strategies for roughing and finishing, presented in the CAM-system Modela Player 4 (MP4), was studied, as a result of which the optimal one for the intended experiment was chosen (9 virtual tests were carried out), processing time was taken as the analyzed parameter. To understand the specifics of the work on the machine under study and to check the suitability of using the processing parameters and the type of strategy, test processing of the foam was carried out. The main optimization criteria are speed, expressed as processing time, and the quality of the resulting surface. At the second stage of the study — experiment — methods for roughing horizontal surfaces of 20×20 mm models, consisting of a truncated pyramid and a hemisphere, are described on a Roland MDX-20 milling machine using MP4. As cutting tools in both studies, a Hanita 400305002 Ø6 mm cylindrical cutter was used for roughing, and a Hanita 400103002 Ø3 mm spherical cutter was used for finishing. The recommended cutting conditions have been established, which allow reducing the processing time of parts by 40–50 % without deteriorating the quality of the machined surfaces.

Keywords: cutting conditions, machining time, types of machining strategies, machining speed, surface quality

For citation

Allenov DG, Yakovleva NA, Deinova KB, Danilov DV, Azanov MV. The choice of optimal cutting conditions, taking into account the quality of the machined surface of the part on the Roland MDX-20 milling machine. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(1):38–51. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-1-38-51>

Введение

Задание оптимальных режимов резания имеет принципиальное значение при механической обработке деталей различной сложности и напрямую влияет на качество получаемой поверхности. Вопрос оптимизации режимов высокоскоростного фрезерования деталей по критерию максимальной производительности рассмотрен в работе [1], где в качестве обрабатываемого материала изучен титановый сплав. Результат работы подразумевал установление сочетания режимов резания (параметров оптимизации: частоты вращения шпинделя станка n , подачи на зуб S_z , глубины резания t), которое позволит обеспечить максимальную производительность

процесса и качество обрабатываемых поверхностей. При этом при поиске оптимального режима обработки изучалась взаимосвязь величины расходов с условиями протекания процесса резания. В ходе работы выявлено, что критерий оптимизации F зависит от трех переменных, указанных выше:

$$F = n \cdot S_z \cdot t \Rightarrow \max. \quad (1)$$

А желаемое достижение максимального значения F выполнимо путем модификации значений параметров оптимизации в определенных допустимых пределах.

Аналогичная работа была проведена в [2], где определение оптимальных режимов резания

для высокоскоростного фрезерования титанового сплава ВТ22 фрезерами с встроенным демпфером выполнено на базе модального и динамометрического анализов [3]: первый из которых основан на измерении собственных частот технологической системы и определении областей стабильного безвибрационного резания (в диапазоне частот вращения шпинделя станка); второй — на измерении проекций сил резания при обработке с целью определения оптимальных конструктивных и геометрических параметров режущего инструмента (РИ), режимов резания и стратегий обработки по такому основному критерию, как минимальных расход энергии на удаление единицы объема материала.

Выводы [1] обоснованно подтверждаются в [4], где анализируется влияние условий обработки на основные характеристики качества поверхностного слоя деталей. В данном труде на базе положения постоянства температуры резания разработан метод установления оптимальных режимов резания — метод ускоренного определения [4], анализируя особенности которого можно констатировать, что в качестве базовых рассмотрены используемые в [1] параметры [4]. А в [5] проведена оптимизация режимов резания для обработки карманов обечайки космического корабля с вафельной конструкцией произвольной геометрии с учетом исключения деформации дна при чистовой обработке. Специфика подхода немного отлична от предыдущих: параметры режима резания (подача на зуб S_z и угол врезания τ) определяются уравнением, при этом выведены допустимые диапазоны, в которых должны находиться рассматриваемые параметры.

Типовая схема назначения и расчета режимов резания при фрезеровании, как один из этапов оптимизации режимов резания, рассмотрена подробно в [6].

В [7] для определения оптимальных режимов обработки используется численное моделирование процесса цилиндрического фрезерования концевой фрезой. Основным оцениваемым параметром выступают максимально допустимые значения пластических деформаций детали и РИ. Изучены модели статички обработки в 3D-постановке задачи на основе конечно-элементарного анализа в программном комплексе Ansys. Вывод оптимальных режимов резания произведен по результату выявления их взаимосвязи с

точностью обрабатываемой детали, деформацией детали и РИ.

Автор [8] относит оптимизацию к главенствующему методу управления обработки резанием, при этом особое внимание, по его мнению, необходимо уделить анализу обрабатываемого материала ввиду различия в природе физико-химических явлений и их интенсивности и работоспособности инструмента, а именно его ресурсу и стабильности работы во времени. Отсюда и необходимость поиска компромиссного решения (оптимального режима резания), позволяющего обеспечить стабильность протекания процесса обработки. Таким образом, актуальность поднятой в нашей научной работе темы не вызывает сомнения.

Современные САМ-системы позволяют организовать внедрение более совершенных технологических процессов посредством подбора наиболее эффективных стратегий обработки и выбора режимов резания в зависимости от вида обработки, РИ и обрабатываемого материала. Один из таких продуктов, который позволяет организовать оптимальную механическую обработку, — программа Modela Player 4 (MP4).

MP4 относится к продвинутым САМ-системам с широким профессиональным функционалом, позволяющим создавать изделия высокого качества: автоматически строит и отображает траекторию РИ, позволяет задать направление фрезерования, области обработки, выполняет 4-осевую обработку [9]. К функциональным возможностям MP4, оказывающим влияние на скорость обработки и качество обрабатываемой поверхности деталей, относятся:

– *вид обработки*: выравнивание, черновая или чистовая обработки, сверление;

– *режущий инструмент*: параметры резания заданы в программе и прикреплены к одному из 20 предложенных видов РИ, допустимо создание нового инструмента;

– *материал*: параметры резания задаются автоматически при выборе материала, список материалов ограничен и представлен наиболее часто используемыми при фрезеровании, допустимо внесение изменений в библиотеку материалов;

– *стратегия обработки изделия* — направления движения РИ во время обработки: по координатам X , Y , $X+Y$; по контурным линиям, начиная с верхней или нижней поверхностей (допустим выбор команд «оптимизация подачи» или

«обработка только по контуру»); по спирали, начиная с верхней или нижней поверхности),

– *параметры резания* (автоматически или корректируются вручную): скорость движения шпинделя, мм/с; по осям *X*, *Y* и *Z*, скорость вращения шпинделя, об./мин; глубина врезания, мм; шаг РИ, мм, припуск под чистовую обработку, мм; остановка на дне отверстия, с.

Цель исследования — оценка особенностей типов стратегий обработки в САМ-системе Modela Player 4 с подбором определенного типа для конкретной модели, который позволит оптимизировать фрезерование на трехкоординатном станке Roland MDX-20, установление оптимальных режимов резания по максимальной производительности при визуальной оценке качества получаемых поверхностей деталей из пенопласта, твердого и мягкого модельных пластиков, древесины твердой породы, выявление зависимости между временем обработки, мощностью и затраченной работой с математической обработкой экспериментальных данных.

1. Материалы и методы

Первый этап исследования — определение времени обработки при разных стратегиях и одинаковых параметрах резания — реализован в виде тестов в программе MP4. Приведенные режимы и стратегии обработки в MP4 не всегда оптимальны для конкретного вида детали, а выбор материала заготовки оказывает влияние на скорость и качество обработки. Исходные данные этапа — параметры резания, которые постоянны на протяжении всего эксперимента.

В качестве РИ применялись для черновой обработки цилиндрическая фреза Hanita 400305002 (твердосплавная без покрытия с плоским торцом для обработки пазов и уступов; диаметр хвостовика — 6 мм; диаметр режущей части (диаметр пятна) — 5 мм; длина — 50 мм; длина режущей кромки — 14 мм; количество зубьев — 3; угол наклона спирали — 37°) (рис. 1, *а*), для чистовой — сферическая фреза Hanita 400103002 (твердосплавная без покрытия со сферическим торцом для трехмерного фрезерования; диаметр хвостовика — 3 мм; диаметр режущей части — 3 мм; длина — 38 мм; длина режущей кромки — 9,5 мм; число зубьев — 2; угол наклона спирали — 30°) (рис. 1, *б*) [10; 11]. Применимость указанных фрез в нашем исследовании допустима: обе

рассматриваемые фрезы общего назначения; фрезы без покрытия с углом наклона спирали порядка 40 град. предназначены для обработки алюминиевых сплавов, что позволяет произвести обработку данными РИ рассматриваемых нами материалов. На данном этапе исследования для простоты эксперимента осуществлены обработки моделей из пенопласта. Параметр оценки допустимости обработки — плотность материала: алюминий (для сравнения) — 2698,9 кг/м³; обрабатываемые материалы: пенопласт — 40–70 кг/м³, модельные пластики — 500–620 кг/м³ (мягкий) и 620–720 кг/м³ (твердый), древесина твердой породы — 550–740 кг/м³.

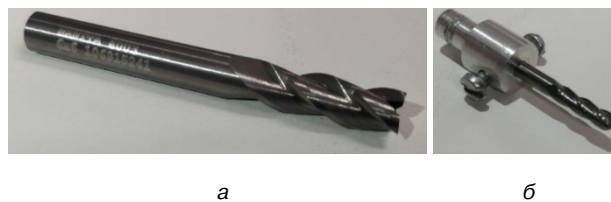


Рис. 1. Режущий инструмент:
а — фреза Hanita 400305002; б — фреза Hanita 400103002
Источник: фото Д.Г. Алленова, К.Б. Дейновой

Figure 1. Cutting tool:
а — milling cutter Hanita 400305002;
б — milling cutter Hanita 400103002
Source: photo by D.G. Allenov, K.B. Deinova

Модель (рис. 2) подготовлена в Компас-3D, состоит из усеченной пирамиды и полусферы, что позволяет оценить специфику фрезерования для рассматриваемых материалов в разных направлениях (например, для дерева вдоль и поперек волокон) и визуально проанализировать обработку поверхностей разной конфигурации (поверхности обработки: сфера, горизонтальная и 4 наклонные плоскости) и, как следствие, оптимальным образом подобрать стратегию обработки, выработав направления по улучшению качества обработки. Предложенная форма модели позволяет осуществить дополнительный анализ: в некоторых точках обработка производилась цилиндрической частью фрезы, что изменяло направление вектора результирующей силы (выявлено ухудшение качества получаемых поверхностей, поскольку вектор силы начал действовать перпендикулярно оси вращения инструмента).

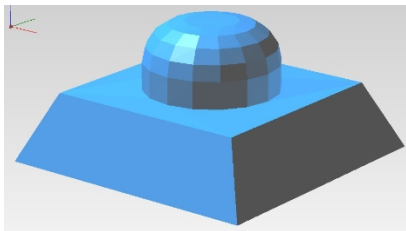


Рис. 2. Обрабатываемая модель
Источник: фото Д.Г. Алленова, К.Б. Дейновой
Figure 2. Processed model
Source: made by D.G. Allenov, K.B. Deinova

Второй этап исследования — экспериментальная часть — включал в себя определение максимально допустимых и оптимальных режимов резания моделей из пенопласта, твердого и мягкого модельных пластиков, древесины твердой породы при черновом фрезеровании горизонтальной поверхности 20×20 мм. Скорость вращения шпинделя станка n не изменялась на протяжении всего эксперимента и была принята равной 6500 об/мин. Применяемый инструмент — цилиндрическая фреза Hanita 400305002 (6 мм).

Скорость резания $v = 125$ м/мин (рассчитана по типовой формуле; допустимая для данной фрезы — 400 м/мин: получено усредненное значение, что позволяет компенсировать отсутствие жесткости системы).

Используемое оборудование — фрезерный станок Roland MDX-20 (рис. 3, а) — гибрид трехкоординатной фрезерной машины и 3D-сканера [12–15]. Технические параметры:

- мощность — 10 Вт;
- скорость вращения — 6500 об/мин;
- подача — 0,1–15 мм/с;
- габариты — $476,8 \times 381,6 \times 305$ мм;
- масса — 13,7 кг;
- рабочая зона — $203,2 \times 152,4 \times 60,5$ мм;
- XY размеры стола — 220×160 мм;
- вес заготовки — 1 кг;
- интерфейс — Serial (RS-232C);
- разрешения 0,025 мм/шаг (программное), 0,00625 мм/шаг (механическое);
- РИ — фрезы, сверла, боры;
- держатель РИ — 6 мм;
- метод сканирования — контактный со скоростью 4–15 мм/сек;
- разрешение сканирования (Dr. PICZA) — 0,05–5 мм с дискретностью 0,05 мм (XY оси) и 0,025 мм (Z-ось);
- сенсор — активный пьезосенсор Roland Active Piezo Scanner (RAPS) длиной 60 мм, диаметр кончика 0,08 мм;
- метод передачи данных — асинхронный, дуплексная передача со скоростью 9600 бит/сек.

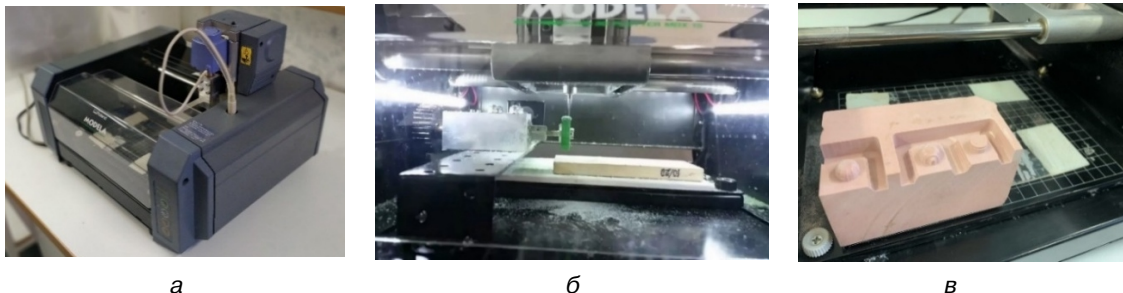


Рис. 3. Фрезерный станок Roland MDX-20: а — общий вид; б, в — рабочая зона обработки
Источник: фото Д.Г. Алленова, К.Б. Дейновой
Figure 3. Roland MDX-20 milling machine: а — general view; б, в — working area of processing
Source: photo by D.G. Allenov, K.B. Deinova

При установленной пьезосканирующей головке RAPS есть возможность оцифровывать 3D-объекты с точностью до 0,05 мм, создавая их точные компьютерные модели: сканирование широкого диапазона объектов, в частности мягких (пластилин, фрукты) и представляющих трудность для оптических сканеров (стеклянные объекты). После смены головки на фрезерную

MDX-20 становится полноценной трехкоординатной фрезерной машиной со способностью обработки дерева, пластика, смолы (модельный, ювелирный воск, пенопласт, оргстекло), химического дерева, мягкого металла (алюминий, латунь), и управляемой с ПК. MDX-20 комплектуется программой 3D Engrave для трехмерной гравировки. ПО для MDX-20: Dr. PICZA, MODELA

Player и Dr. 3D Engrave. Программа Virtual MODELA визуализирует процесс обработки с учетом выбранного инструмента, показывая чистоту и время обработки. Назначение MDX-20: моделирование, полиграфия, ювелирное дело (работа с золотом, серебром, платиной; изготовление мастер-моделей из восков, ювелирных пластиков и цветных металлов; обработка янтаря, бивня мамонта), изготовление прототипов и литейных форм, дизайн упаковки, гравировка по различным материалам. На рис. 3, б, представлена рабочая зона обработки.

Состав экспериментальной установки: Roland MDX-20, РИ, совместимое со станком ПО Modela Player 4, предназначение которого заключалось в описании стратегии обработки, задании режимов резания и предварительном подборе оптимального типа стратегии.

2. Результаты и обсуждения

Принцип черновой обработки — послонно выбрать максимум припуска для исключения его дальнейшего влияния на отжим фрезы, что на выходе позволяет при чистовой обработке компенсировать жесткостью РИ оставшийся припуск, не ухудшив качество конечной поверхности деталей. Принятые допущения: технологическая система СПИД (станок, приспособление, инструмент, деталь) не обеспечена должной жесткостью (вылет

цилиндрической фрезы Hanita 400305002 — 40 мм — примерно 7 диаметров); модель крепилась на столе двухсторонним скотчем, что не позволяет обеспечить должное закрепление при обработке; отсутствовала получистовая обработка, основное предназначение которой — обеспечить равномерное распределение припуска перед обработкой начисто. Оценка механообработки производится современным методом: за счет объема снимаемого материала за единицу времени (производительность). При фрезеровании на протяжении всего эксперимента отсутствовало сопровождение обработки подачей СОЖ или воздуха, что компенсируется невысокой скоростью резания. Оцениваемые в данной статье параметры представлены для черновой обработки, для визуальной оценки приемлемости осуществления обработок по заданным входным параметрам (проверки процессов и окончательного качества: достижения заданного размера и обеспечения наименьшей шероховатости поверхности) модели из пенопласта и мягкого модельного пластика дорабатывались сферической фрезой Hanita 400305002 начисто. Скорость резания при чистовой обработке — 62 м/мин.

Тесты в пространстве MP4 (первый этап исследования) проведены для черновой и чистовой обработок: визуализация тестирований для первой из них представлена на рис. 4, для второй — на рис. 5. Полученные результаты тестирования представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Результаты тестирования в Modela Player 4

№ теста / Test No	Название стратегии обработки / Test results in Modela Player 4	Время обработки, с / Time of processing, sec	
		Черновая / Roughing	Чистовая / Finishing
1	Сканирующие линии по осям X, Y / Scanning lines along the X, Y axes	140	287
2	Сканирующие линии по X+Y / Scanning lines along the X+Y axes	300	575
3	Обработка только в одном направлении по осям X или Y / Machining in only one direction along the X or Y axes	266	590
4-5	По контурным линиям (Up cut и Down cut) / Along the contour lines (Up cut and Down cut)	126	724
6	По контурным линиям (Up + Optimized pitch) / Along the contour lines (Up + Optimized pitch)	–	868
7	По контурным линиям (Up + Optimized pitch + Outline only) / Along the contour lines (Up + Optimized pitch + Outline only)	–	680
8-9	По спирали (Up cut и Down cut) / In a spiral (Up cut and Down cut)	–	229
Незаполненные ячейки — стратегии применимы только для чистовой обработки (не задаются в MP4) / Empty cells — strategies are applicable only for finishing (not specified in MP4).			

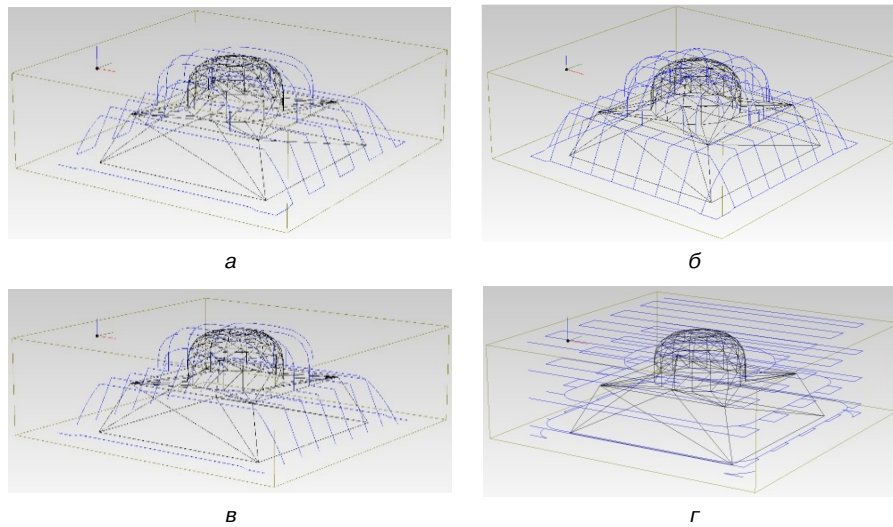


Рис. 4. Черновая обработка (по номерам тестов): а — 1; б — 2; в — 3; г — 4-5
Источник: выполнено Д.Г. Алленовым, К.Б. Дейновой
Figure 4. Roughing (according to test numbers): а — 1; б — 2; в — 3; г — 4-5
Source: made by D.G. Allenov, K.B. Deinova

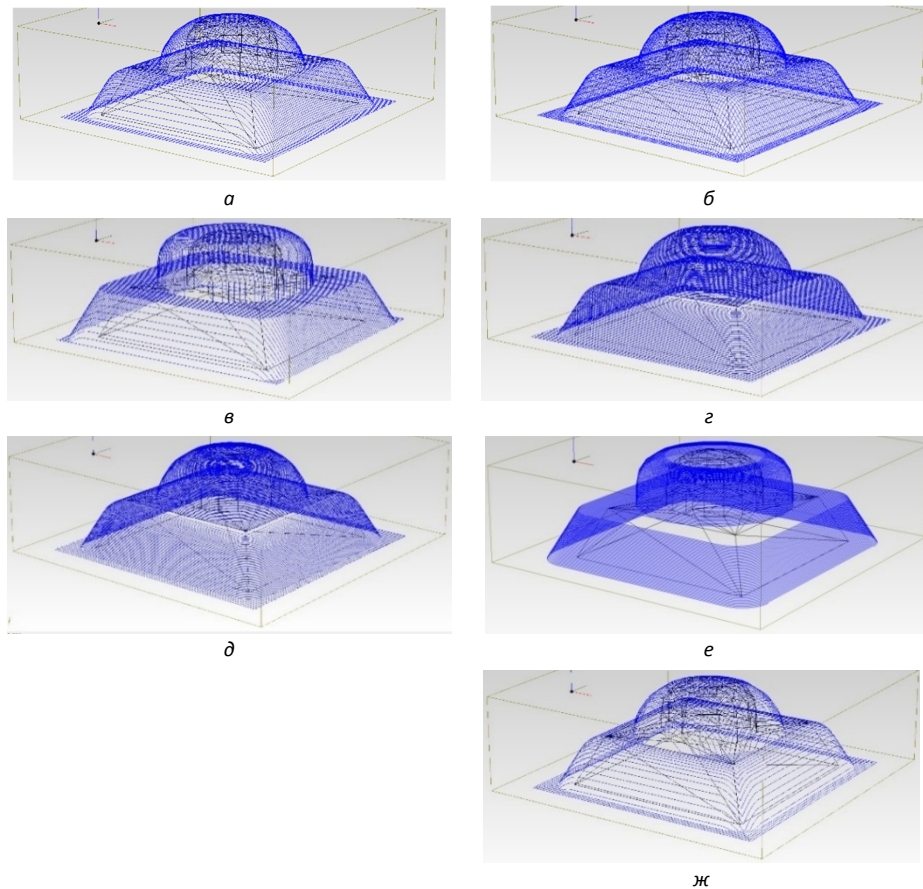


Рис. 5. Чистовая обработка (по номерам тестов): а — 1; б — 2; в — 3; г — 4-5; д — 6; е — 7; ж — 8-9
Источник: выполнено Д.Г. Алленовым, К.Б. Дейновой
Figure 5. Finishing (according to test numbers): а — 1; б — 2; в — 3; г — 4-5; д — 6; е — 7; ж — 8-9
Source: made by D.G. Allenov, K.B. Deinova

По результату первого этапа исследования можно сделать ряд выводов:

1) время обработки при стратегии сканирующих линий по осям $X + Y$ увеличилось в 2 раза по сравнению с временем, что по осям X, Y , при этом качество обработки значительно возросло;

2) при изменении стратегии на выполняемую только в одном направлении качество обработки осталось прежним, затрачиваемое время изменилось незначительно, стратегия подходит для материала, обрабатываемого вдоль волокон (дерево);

3) при анализе стратегии «По контурным линиям (Up cut и Down cut)» отличия в качестве обработок не выявлены, особенность в начальной плоскости обработки — верхняя или нижняя.

4) для стратегии «По контурным линиям (Up + Optimized pitch)» относительно прошлых тестов количество линий обработки вертикальных поверхностей увеличилось;

5) «по контурным линиям (Up + Optimized pitch + Outline only)»: после добавления в стратегию функции Outline only обработка горизонтальной поверхности не проводилась.

Таким образом, за базовую принята стратегия «Сканирующие линии по оси X ».

На втором этапе, оперируя полученными в МР4 данными, режимные параметры условно разделили на предустановленные, рекомендуемые и максимальные. Работа в МР4: загрузка модели, выбор материала, типа процесса (вида обработки), задание РИ, координат его захода (первая точка обработки), стратегии и параметров обработки. Точка привязки задавалась методом касания РИ, а при задании исходных параметров нулевая точка предлагалась автоматически, привязываясь к положению модели (выбранной контактным методом точке на поверхности: позиционирование модели на столе — входной параметр). Предустановленные режимы резания выводились автоматически при задании указанных выше входных данных, рекомендуемые — оптимальные — установлены экспериментально при достижении наилучших условий и времени обработки: изначально задавался интервал входных параметров близкий к среднему значению (от предустановленных и максимальных). Для выявления оптимальных

режимных параметров устанавливалась максимальная скорость движения шпинделя (15 мм/с — по паспорту станка). Глубина резания и шаг РИ выявлялись экспериментальным путем (фиксируются при явном нарушении критериев — плавность работы, шум, перегрев). Режимы резания принимались максимальными (по мощности станка), для оценки приемлемости работы осуществлен аналитический [18] расчет потребляемой мощности:

$$N = \frac{t \cdot B \cdot S_{\text{мин}} \cdot k_c}{60 \cdot 10^6}, \quad (2)$$

где t — глубина резания, мм; B — ширина фрезерования, мм; $S_{\text{мин}}$ — скорость подачи, мм/мин; k_c — удельная сила резания, Н/мм² (для алюминиевых сплавов от 350 до 1250 Н/мм²) [19].

Удельная сила резания — касательная сила, необходимая для срезания слоя сечением 1 мм² (постоянная величина для каждого обрабатываемого материала).

Одними из главных критериев оценки максимальной нагрузки служили параметры, при которых шпиндель станка переставал вращаться или РИ начинал разрушать обрабатываемую поверхность, оптимальной — плавность работы станка (минимум производственного шума на рабочем месте), отсутствие перегрева мотора привода шпинделя при длительной нагрузке. Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 2.

Оптимизация режимных параметров направлена на уменьшение (за счет задания соответствующих режимных параметров) времени обработки, которое возможно организовать путем повышения потребляемой мощности: увеличения ширины, глубины фрезерования и подачи (до 15 мм/с). Выбор обрабатываемого материала диктует проработку особенностей оптимизации для рассматриваемых малоизученных и «неклассических» материалов, например, для модельного пластика при отсутствии запаса мощности характерно дробление.

Отмечаем, что по причине отсутствия программы Virtual MODELA и особенностей структур исследуемых материалов, оценка качества производилась только визуально.

Таблица 2

Определение максимально допустимых и оптимальных режимов резания

Режимы резания	S , мм/с		S_z , мм/зуб	t , мм	B , мм	T_0 , с	N , Вт	Q , см ³ /с	A , Дж
	оси XY	ось Z	оси XY						
Обработка пенопласта при $k_c = 50$ Н/мм ²									
Предустановленные	10	1	0,031	1	3	89	1,5	0,030	2,7
Рекомендуемые	15	15	0,046	3	4	50	9,0	0,180	9,0
Максимальные	15	15	0,046	3	4	50	9,0	0,180	9,0
Обработка мягкого модельного пластика при $k_c = 250$ Н/мм ²									
Предустановленные	10	0,3	0,031	0,3	2	340	1,7	0,007	2,4
Рекомендуемые	13	0,7	0,040	0,5	3	102	5,0	0,020	2,0
Максимальные	15	0,8	0,046	0,5	3	90	6,0	0,024	2,2
Обработка твердого модельного пластика при $k_c = 300$ Н/мм ²									
Предустановленные	8	0,2	0,025	0,2	2	410	1,0	0,003	1,2
Рекомендуемые	12	0,2	0,037	0,2	3	230	2,2	0,007	1,6
Максимальные	15	0,2	0,046	0,2	4	180	3,8	0,013	2,3
Обработка древесины твердой породы при $k_c = 250$ Н/мм ²									
Предустановленные	8	0,2	0,025	0,2	2	420	0,8	0,002	0,8
Рекомендуемые	12	0,2	0,037	0,3	3	231	2,7	0,011	2,5
Максимальные	15	0,3	0,043	0,2	3	207	2,5	0,010	2,1

Примечание. S — скорость подачи, мм/с; S_z — подача на зуб, мм/зуб; t — глубина врезания (резания), мм; B — шаг режущего инструмента (ширина фрезерования), мм; T_0 — время обработки, с; N — потребляемая мощность, Вт; Q — производительность, см³/с; A — работа, Дж.

Table 2

Determination of the maximum allowable and optimal cutting conditions

Cutting conditions	S , mm/sec		S_z , mm/tooth	t , mm	B , mm	T_0 , sec	N , Wt	Q , sm ³ /sec	A , J
	axes XY	axis Z	axes XY						
Processing of styrofoam at $k_c = 50$ N/mm ³									
Preinstalled	10	1	0.031	1	3	89	1.5	0.030	2.7
Featured	15	15	0.046	3	4	50	9.0	0.180	9.0
Maximum	15	15	0.046	3	4	50	9.0	0.180	9.0
Processing of soft modeling plastic at $k_c = 250$ N/mm ³									
Preinstalled	10	0.3	0.031	0.3	2	340	1.7	0.007	2.4
Featured	13	0.7	0.040	0.5	3	102	5.0	0.020	2.0
Maximum	15	0.8	0.046	0.5	3	90	6.0	0.024	2.2
Processing of solid modeling plastic at $k_c = 300$ N/mm ³									
Preinstalled	8	0.2	0.025	0.2	2	410	1.0	0.003	1.2
Featured	12	0.2	0.037	0.2	3	230	2.2	0.007	1.6
Maximum	15	0.2	0.046	0.2	4	180	3.8	0.013	2.3
Processing of hardwood at $k_c = 250$ N/mm ³									
Preinstalled	8	0.2	0.025	0.2	2	420	0.8	0.002	0.8
Featured	12	0.2	0.037	0.3	3	231	2.7	0.011	2.5
Maximum	15	0.3	0.043	0.2	3	207	2.5	0.010	2.1

Note. S — feed rate, mm/sec; S_z — feed per tooth, mm/tooth; t — plunging depth (cutting), mm; B — cutting tool pitch (milling width), mm; T_0 — time of processing, sec; N — power consumption, Wt; Q — performance, sm³/sec; A — working, J.

Согласно¹ [20], зависимость между производительностью (скоростью съема материала) Q и затраченной механической мощностью N :

$$Q = \frac{1}{k_c} \cdot N = \frac{B \cdot t \cdot S_{\text{мин}}}{1000}, \quad (3)$$

Задача данного исследования — связать время обработки с мощностью через затраченную работу.

Производительность — объем снимаемого материала [24] (произведение глубины, ширины и подачи) за единицу времени (рис. 6 — интегральная функция (закон) распределения):

$$N = Q \cdot k_c \Rightarrow dN = Q(k_c) \cdot d(k_c) \Rightarrow \\ \Rightarrow Q(k_c) = \frac{dN}{d(k_c)} = N'(k_c). \quad (4)$$

Производительность — первая производная мощности по удельной силе резания:

$$N = \int_{k_{c1}}^{k_{c2}} Q(k_c) d(k_c). \quad (5)$$

Значение производительности можно найти графически, как площадь фигуры под графиком зависимости мощности от удельной силы резания. Поскольку k_c всегда постоянна (значение по

оси абсцисс — const), построение графика нецелесообразно: в нашем случае дифференциал аргумента (максимально маленькое приращение по оси абсцисс) $d(k_c)$ — постоянная величина (принимается в зависимости от материала), то есть всегда проецируется в одну точку на оси абсцисс, а площадь фигуры под графиком зависит от изменения величины по оси ординат, то есть затрачиваемой на обработку мощности N , и постоянного коэффициента $d(k_c)$, кроме того, полученные графики и формулы применимы только для рассматриваемого материала и имеющихся исходных данных — разброс данных минимален. Таким образом, нахождение значения производительности Q графически ошибочно, с точки зрения математического описания экспериментальных данных.

Работа характеризует скорость съема материала за единицу времени

$$A = Q \cdot t. \quad (6)$$

Если рассмотреть совершаемую работу за единицу времени, то дифференциал функции:

$$dA = Q(t) \cdot dt \Rightarrow A'(t) = Q(t). \quad (7)$$

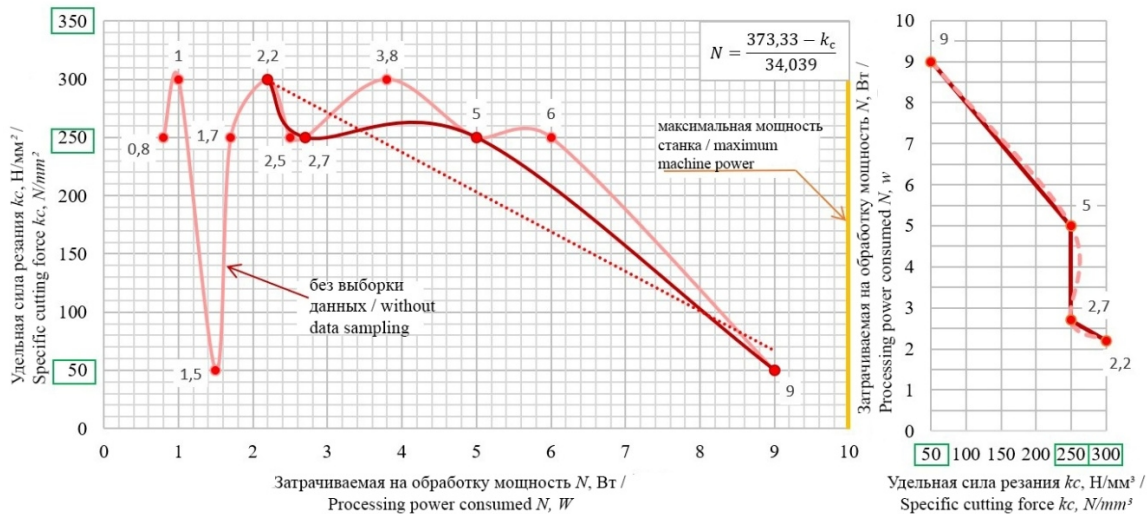


Рис. 6. Графики зависимостей между мощностью N и удельной силой резания k_c

Источники: выполнено Д.Г. Алленовым, К.Б. Дейновой

Figure 6. Graphs of dependencies between power N and specific cutting force k_c

Source: made by D.G. Allenov, K.B. Deinova

¹ Sandvik Coromant. Sweden; 2009.

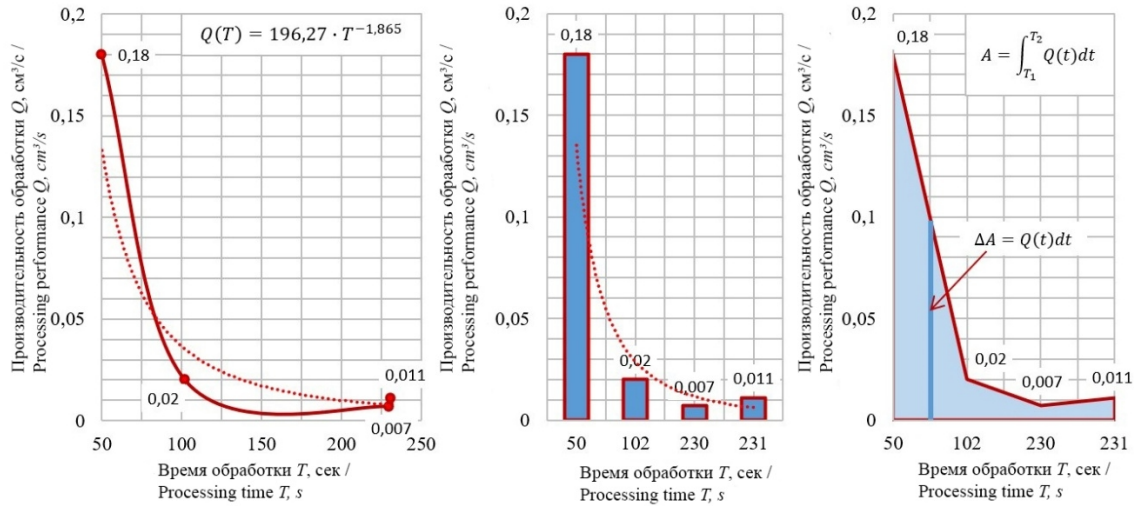


Рис. 7. Графики зависимостей между производительностью Q и временем обработки T
 Источники: выполнено Д.Г. Алленовым, К.Б. Дейновой

Figure 7. Graphs of dependencies between productivity Q and processing time T
 Source: made by D.G. Allenov, K.B. Deinova

Таким образом, производительность — первая производная работы по времени, тогда работу можно найти через определенный интеграл, и она будет представлена как сумма бесконечного числа бесконечных слагаемых (площадь фигуры под графиком, см. рис. 7):

$$A = \int_{T_1}^{T_2} Q(t) dt. \quad (8)$$

Результат расчета значений производительности и работы представлен в табл. 2. По полученным данным построены зависимости (см. рис. 7 — дифференциальная функция (закон) плотности распределения). Математическое описание зависимостей осуществлено в Microsoft Excel: по максимальному коэффициенту детерминации R^2 выведены уравнения нелинейной регрессии. Отмечаем, что данные выражения применимы исключительно для рассмотренных случаев: конкретного инструмента, входных данных эксперимента, диапазона N до 10 Вт, значений удельных сил резания k_c (в зависимости от материала: 50, 250, 300 Н/мм³).

Таким образом, способы нахождения параметров:

– мощность N — по формуле (линейная линия тренда с $R^2 = 0,9058$);

$$N = \frac{373,33 - k_c}{34,039}; \quad (9)$$

– производительность Q — по формуле (степенная линия тренда с $R^2 = 0,9750$);

$$Q(T) = 196,27 \cdot T^{-1,865}; \quad (10)$$

– работа A — графически — как площадь фигуры под графиком зависимости производительности Q от времени обработки T (см. рис. 7).

Достижение оптимальных режимов резания обеспечивается выявлением времени обработки, при которых появляется возможность приблизиться к максимальной мощности, выдаваемой станком (достижением максимума скорости движения шпинделя, выявленной экспериментально) в пределах допустимой в условиях эксперимента плавности работы системы СПИД (с учетом допущений, указанных выше).

Оптимизация режимных параметров (формула (1)) при обработке пенопласта (рис. 8, а) позволила сократить время обработки приблизительно в 1,8 раза. Отмечаем, что при максимальных параметрах РИ не успевал обрабатывать поверхности, вырывание зерен пенопласта происходило при увеличении глубины снимаемого слоя до 4 мм, однако в рамках исследования данные параметры — самые эффективные. Обработка мягкого модельного пластика (рис. 8, б) на максимальных режимах резания характеризо-

валась затруднением работы станка и интенсивным нагревом мотора привода шпинделя [9]. Для твердого модельного пластика при рекомендуемом режиме резания скорость обработки увеличилась в 2 раза при неизменном получаемом качестве, при максимальном — остановка шпинделя [16]. Обработка древесины твердой породы (рис. 8, в) производилась вдоль волокон (в отличие от однородных по структуре модельных

пластиков, где направление фрезерования не имело значения). При достижении максимального режима резания зафиксирована неравномерность обработки поверхности, РИ начинал не срезать, а вырывать волокна [17]. Наиболее характерные результаты (рис. 9), подтверждающие правильность подбора режимов, отвечающих требованиям оптимизации, получены на моделях из дерева (причина: волокнистость).

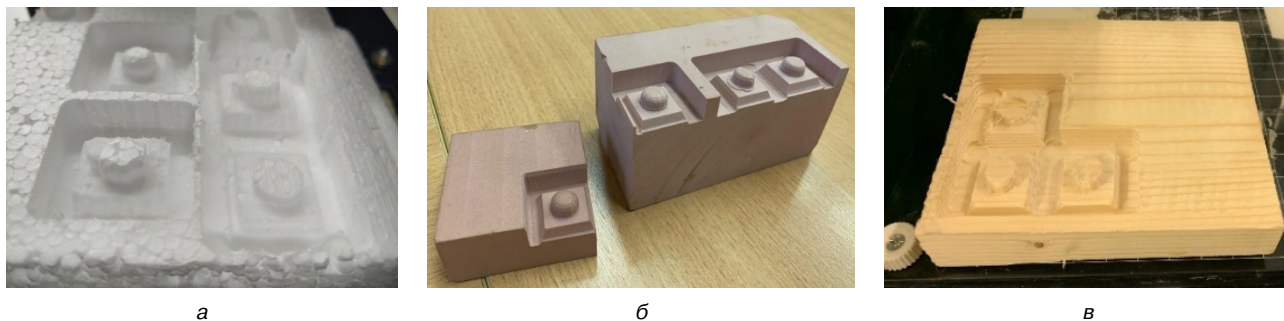


Рис. 8. Результат обработки: а — пенопласт; б — мягкий модельный пластик; в — древесина твердой породы
Источник: фото Д.Г. Алленова, К.Б. Дейновой

Figure 8. The result of processing: а — styrofoam; б — soft modeling plastic; в — hardwood
Source: photo by D.G. Allenov, K.B. Deinova



Рис. 9. Наиболее показательный результат обработки (древесина твердой породы)
Источник: фото Д.Г. Алленова, К.Б. Дейновой

Figure 9. The most significant processing result (hardwood)
Source: photo by D.G. Allenov, K.B. Deinova

Заключение

По результату исследования представленных в пространстве Modela Player 4 типов стратегий можно утверждать: для обработки древесины лучше всего подходят стратегии «Сканирующие линии по осям X , Y » или «Обработка только в одном направлении по осям X или Y », поскольку при расположении заготовки волок-

нами вдоль выбранной оси обработка происходит равномерно без вырывания; для модельного пластика и пенопласта при черновой обработке рекомендуется использовать стратегии «По контурным линиям (Up cut и Down Cut)» (минимальное время обработки и качественная подготовка к чистовой обработке).

Эмпирически установленные рекомендуемые режимы резания сокращают время обработки деталей в среднем на 40–50 %, не ухудшая качество обрабатываемой поверхности, при этом вывод по качеству обработки производился визуальной оценкой чистоты получаемых поверхностей (однородность получаемой поверхности, соответствие изначально заданной форме модели, отсутствие видимых дефектов и вырывания волокон (для дерева), необходимость доводки поверхностей). Следует отметить, что при превышении максимальных значений происходит остановка шпинделя из-за нехватки мощности. Номинальные значения, определенные программой, являются самыми щадящими для станка и гарантирующими работоспособность в течение гарантийного срока службы.

Оперируя трудами представленного обзора, оптимизация выполнена по таким параметрам, как максимальная производительность процесса (время обработки, отсутствие вибраций, остатков оборудования) и достижение желаемого качества обрабатываемых поверхностей. При этом в качестве параметров оптимизации приняты частота вращения шпинделя станка n , подача на зуб S_z , глубина резания t . Основные критерии оптимизации: качество обработки при визуальной оценке и сокращение времени обработки с максимальным соблюдением корректности работы — позволяют констатировать выработку направления к явной тенденции по возможному повышению производительности для обработки рассматриваемых нами материалов.

Список литературы

1. Гавриленко Я.Н., Мозговой С.В., Павленко Д.В. Оптимизация режимов высокоскоростного фрезерования деталей из титановых сплавов // Вестник двигателестроения. 2006. № 1. С. 123–129.
2. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6(2). С. 476–479. EDN: SEWSON
3. Савилов А.В. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа // Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1–2. С. 42–46.
4. Макаров А.Д. Оптимизация процесса резания. М.: Машиностроение, 1976.
5. Зайцев А.М., Шачнев С.Ю., Грубый С.В. Оптимизация режимов резания при фрезеровании карманов обечайки с вафельной конструкцией // Космическая техника и технологии. 2020. № 3(30). С. 14–23.
6. Свирева Д.М., Сухоцкий С.А. Учебно-методическое издание «Резание материалов». Могилев: МОУ ВО «Белорусско-Российский университет», 2015. С. 24–31.
7. Галицкий П.И., Гисметулин А.Р. Оптимизация режимов резания операцией фрезерования на основании данных инженерных расчетов в системе Ansys // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. 2019. № 1. С. 24–34.
8. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009.
9. Roland. Поставляемое программное обеспечение URL: https://rdm24.ru/products/dophar/detail.php?ELEMENT_ID=506 (дата обращения: 15.04.2023).
10. Hanita — Тип 4003. URL: <http://t-tool.ru/catalog/tools/hanita/4003.php> (дата обращения: 15.04.2023).
11. Hanita — Тип 4001. URL: <http://t-tool.ru/catalog/tools/hanita/4001.php> (дата обращения: 15.04.2023).
12. 3D-фрезер. Институт информационных технологий. URL: <https://iit.vvsu.ru/education/base/fablab/3D%20fraser/> (дата обращения: 15.04.2023).
13. Фрезерно-гравировальный станок Roland Modela MDX-20. URL: <https://www.forsign.ru/catalog/oborudovanie/> (дата обращения: 15.04.2023).
14. Roland GP corporation. This User's Manual is intended for MDX-20 and MDX-15. USA, 2010. 72 p.
15. MDX-20 Настольная фрезерная машина и 3D сканер MODELA. URL: <http://www.juvin.ru/index.php?productID=435> (дата обращения: 15.04.2023).
16. Жуков А.Д. Деревообработка. Инструменты и оборудование. М.: Феникс, 2006.
17. Яковлев А.Д. Технология изготовления деталей из пластмасс. М.: Химия, 1977.
18. Потребляемая мощность при фрезерной обработке материалов. URL: <https://www.intuwiz.ru/calcs/mill-power.html> (дата обращения: 15.04.2023).
19. АБ универсал. Режимы обработки модельного пластика Obomodulan. URL: <http://абуниверсал.рф/equipment/consumables/oboMachining.php> (дата обращения: 15.04.2023).
20. Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Зиняев В.В. Оценка максимальной производительности обрабатываемого центра с ЧПУ, оснащенного интегрированным мотор-шпинделем (энергетический аспект) // Вестник двигателестроения. 2010. № 1. С. 91–95. EDN: WIYEPV

References

1. Gavrilenko YaN., Mozgovoy SV., Pavlenko DV. Optimization of modes of high-speed milling of parts from titanium alloys. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2006; 1:123–129. (In Russ.)
2. Savilov AV., Pyatykh AS., Timofeev SA. The modern methods of optimization the high productive milling. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(6(2)):476–479. (In Russ.) EDN: SEWSON
3. Savilov AV. Optimization of machining processes based on modal and dynamometric analysis. *Science and technology in industry*. 2013;1-2:42–46. (In Russ.)
4. Makarov AD. *Optimization of the cutting process*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1976. (In Russ.)
5. Zaitsev AM., Shachnev SYu., Gruby SV. Optimization of cutting conditions when milling shell pockets with a wafer structure. *Space technics and technologies*. 2020;3(30):14–23. (In Russ.)
6. Svirepa DM., Sukhotsky SA. *Educational and methodical edition «Cutting materials»*. Mogilev: IEI HE «Belarusian-Russian University»; 2015;24–31.
7. Galitskov PI., Gismetulin AR. Optimization of cutting conditions by milling operation based on engineering calculations data in the Ansys system. *Uchenye zapiski UIGU. Ser. Mathematics and Information Technology*. 2019; 1:24–34. (In Russ.)

8. Starkov VK. *Physics and optimization of cutting materials*. Moscow: Mashinostroenie; 2009. (In Russ.)
9. Roland. *Supplied software*. Available from: https://rdm24.ru/products/dophar/detail.php?ELEMENT_ID=506 (accessed: 15.04.2023)
10. Hanita — Type 4003. Available from: <http://t-tool.ru/catalog/tools/hanita/4003.php> (accessed: 15.04.2023)
11. Hanita — Type 4001. Available from: <http://t-tool.ru/catalog/tools/hanita/4001.php> (accessed: 15.04.2023)
12. 3D milling machine. Institute of Information Technologies. Available from: <https://iit.vvsu.ru/education/base/fablab/3D%20fraser/> (accessed: 15.04.2023)
13. Milling Engraving machine Roland Modela MDX-20 [cited 15 April 2023]. Available from: <https://www.forsign.ru/catalog/oborudovanie/> (accessed: 15.04.2023).
14. Roland GP corporation. *This User's Manual is intended for MDX-20 and MDX-15*. USA; 2010.
15. MDX-20 Desktop milling machine and 3D scanner MODELA. Available from: <http://www.juvin.ru/index.php?productID=435>.
16. Zhukov AD. *Woodworking. Tools and equipment*. Moscow: Phoenix; 2006. (In Russ.)
17. Yakovlev AD. *Technology for the manufacture of plastic parts*. Moscow: Chemistry; 1977. (In Russ.)
18. Power consumption during milling processing of materials. Available from: <https://www.intuwiz.ru/calcs/mill-power.html> (accessed: 15.04.2023)
19. AB universal. Processing modes of Obomodulan model plastic. Available from: <http://абуниверсал.рф/equipment/consumables/oboMachining.php> (accessed: 15.04.2023)
20. Bolsunovsky SA., Vermel VD., Gubanov GA., Zinyaev VV. Evaluation of the maximum performance of a CNC machining center equipped with an integrated motor-spindle (energy aspect). *Vestnik dvigatelestroyeniya*. 2010;1;91–95. EDN: WIYEPV.

Сведения об авторах

Алленов Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARI SPIN-код: 4589-8524; ORCID: 0000-0002-3663-1790; E-mail: allenov-dg@rudn.ru

Яковлева Надежда Александровна, магистрант базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0007-0731-7990; E-mail: yana_485@mail.ru

Дейнова Кристина Борисовна, магистрант базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARI SPIN-код: 2640-1910; ORCID: 009-0002-1864-9564; E-mail: kristina.deinova@yandex.ru

Данилов Данила Валерьевич, выпускник базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0000-2551-9034; E-mail: 1032172557@rudn.ru

Азанов Матвей Васильевич, ассистент базовой кафедры энергетического машиностроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARI SPIN-код: 6483-4716; ORCID: 0000-0003-3053-9210; E-mail: azanov-mv@rudn.ru

About the authors

Dmitry G. Allenov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Basic Department of Mechanical Engineering Technologies, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARI SPIN-code: 4589-8524; ORCID: 0000-0002-3663-1790; E-mail: allenov-dg@rudn.ru

Nadezhda A. Yakovleva, Master's Student of the Basic Department of Mechanical Engineering Technologies, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0007-0731-7990; E-mail: yana_485@mail.ru

Kristina B. Deinova, Master's Student of the Basic Department of Mechanical Engineering Technologies, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARI SPIN-code: 2640-1910; ORCID: 009-0002-1864-9564; E-mail: kristina.deinova@yandex.ru

Danila V. Danilov, Graduate of the Basic Department of Mechanical Engineering Technologies, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0000-2551-9034; E-mail: 1032172557@rudn.ru

Matvey V. Azanov, Assistant at the Basic Department of Power Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARI SPIN-code: 6483-4716; ORCID: 0000-0003-3053-9210; E-mail: azanov-mv@rudn.ru