

ЭВРИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСРЕДСТВОМ СИНТЕЗА ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ОППОЗИТНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

© 2025

Е. А. Шестакова старший преподаватель кафедры технологии машиностроительных производств;
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева;
anburg@mail.ru

В. О. Иевлев кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроительных производств;
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева;
voievlev@kai.ru

Р. М. Ямбаев кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроительных производств;
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева;
ruslan-vanbaev@mail.ru

Представлен сравнительный анализ существующих технологий фрезерования. Выявлено влияние основных отрицательных факторов, влияющих на качество обрабатываемых поверхностей. Предложены оптимальные схемы обработки оппозитными фрезами. Проведено моделирование процессов фрезерования оппозитно-расположенными фрезами тонкостенных протяжённых авиационных деталей. Исследуемый процесс описан соответствующими физическими величинами. Рассмотрена система из восьми характеристических уравнений, описывающих режимы и составляющие сил резания, а также динамику процесса фрезерования. Получено характеристическое уравнение в безразмерном виде, связывающее геометрические параметры режущего инструмента, величину подачи и частоту вращения фрезы. После проверки синтезированной математической модели расчётом была проведена экспериментальная проверка предлагаемой модели на адекватность реальному процессу при обработке оппозитно расположенными концевыми фрезами соответствующих стенок заготовок нервюр и балок из алюминиевого сплава, изготовленных штамповкой. Механически обработаны ребра колодцев и карманов авиационных деталей в условиях мелкосерийного производства. Замеры шероховатости проводились на профилографе-профилометре. Были определены оптимальные значения показателей степеней и соответствующих коэффициентов при симплексах математической модели. Проведён сравнительный анализ практических показателей и смоделированных данных процесса фрезерования. Полученная модель позволяет спрогнозировать результаты обработки предлагаемым способом с погрешностью 10-15%.

Тонкостенные авиационные детали; алюминиевый сплав; нервюра; балка; фрезерование; оппозитное расположение концевых фрез; теория размерностей; силы резания; колебания стенки

Цитирование: Шестакова Е.А., Иевлев В.О., Ямбаев Р.М. Эвристическое моделирование посредством синтеза прогностической модели процесса фрезерования авиационных деталей оппозитно расположенными концевыми фрезами // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 1. С. 174-184. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-174-184

Был теоретически описан и исследован процесс фрезерования малоустойчивых, тонкостенных и протяжённых авиационных деталей оппозитно расположенными концевыми фрезами. Механической обработке подвергались рёбра колодцев и карманов авиационных деталей типа нервюр и балок (рис. 1.) Детали такого типа выпускаются в условиях мелкосерийного производства.

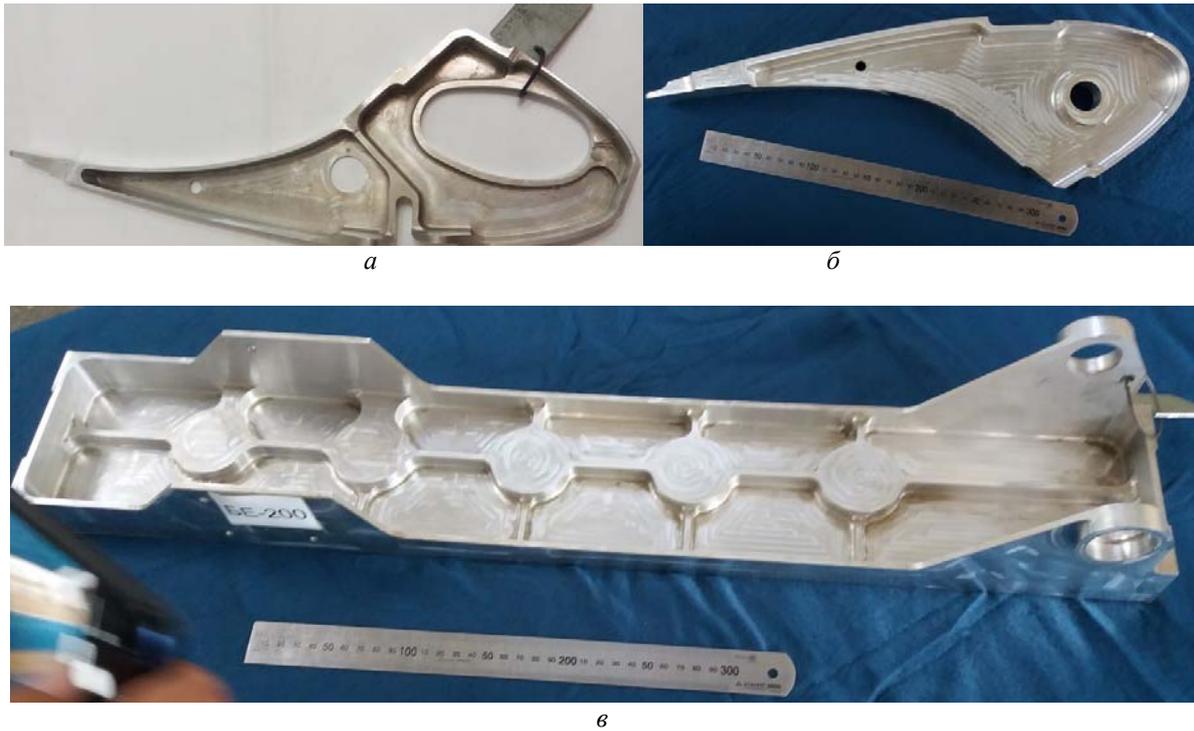


Рис. 1. Типовые авиационные детали: а, б – нервюры; в – балка

В процессе фрезерования одной фрезой представленных на рис. 1 авиационных деталей в ряде случаев наблюдаются недопустимые вибрационные процессы, отжимы стенок фрезой, что может привести к несоответствию геометрии и формы деталей и, как следствие, к браку. Вибрационные процессы значительно снижают качество поверхности детали. Опасные вибрации являются следствием малой устойчивости и тонкостенности обрабатываемых стенок колодцев и карманов. Для снижения вибраций на производстве процесс обработки ведут на минимальных режимах резания, что обуславливает низкую производительность. С целью повышения производительности и качества обработки существуют технологии фиксации обрабатываемой стенки с противоположной стороны относительно фрезы синхронно движущимся роликом [1]. Прижимной ролик необходимо крепить к фрезерной головке станка или к дополнительной оси на рабочем столе, что усложняет конструкцию оснастки. Необходимо вносить изменения в конструкцию станка, что не всегда возможно или достаточно затратно. Конструкции прижимных роликов строго индивидуальны и привязаны к конкретной детали, что значительно усложняет технологическую подготовку производства. При этом увеличение производительности невелико.

Кроме того, в условиях мелкосерийного производства использование при механической обработке прижимного ролика нецелесообразно. Авиационные детали в большинстве своем имеют уклоны исходя из способа получения заготовки, что также не позволяет с технологической точки зрения применять прижимной ролик при механической обработке.

Известна технология заливки легкоплавкими сплавами противоположной стороны обрабатываемой стенки относительно фрезы. Такой способ для обработки авиационных деталей неэффективен.

Авторами предложен способ фрезерования стенок колодцев и карманов авиационных деталей оппозитно расположенными фрезами [2]. Каждая фреза имеет свой привод с ЧПУ, что позволяет реализовывать сложные траектории перемещения фрез и об-

работку стенок переменной толщины. В работе выбрана схема б (рис. 2, б) попутного фрезерования, обеспечивающая минимальную шероховатость получаемой поверхности.

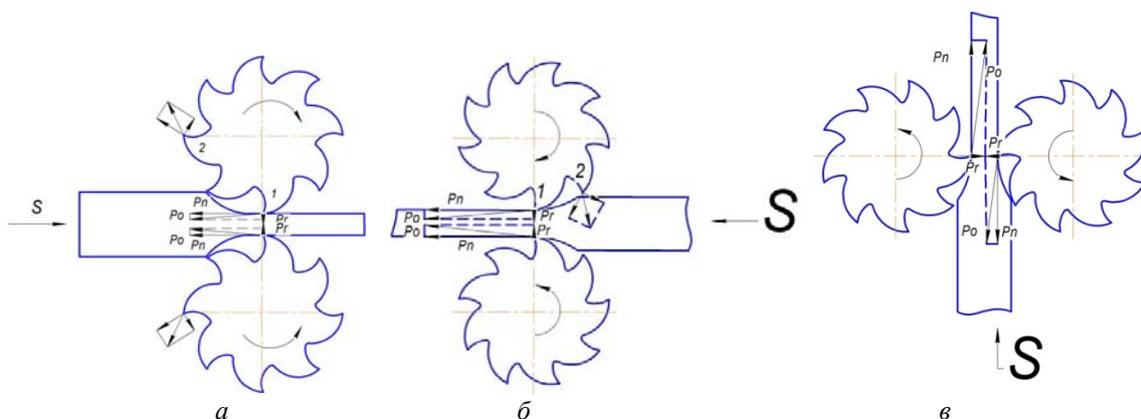


Рис. 2. Возможные схемы обработки оппозитными фрезами:
 а – встречное; б – попутное; в – смешанное

Синтез рабочей формулы состоит из двух частей. Первая часть – постановка и формулирование задачи. Вторая часть – описание исследуемого процесса соответствующими физическими величинами [3].

Постановка задачи теоретического исследования

Процесс фрезерования зависит от многих величин и технологических параметров процесса резания. Учесть все величины невозможно. Вследствие стохастичности процесса резания технологические параметры имеют вероятностное значение. Сложно создать детерминированные зависимости точностных характеристик от режимов резания и условий обработки. По этой причине авторами предложена методика описания исследуемого процесса, опирающаяся на элементы теории размерностей [4]. За количественный критерий оценки эффективности фрезерования поверхности выбрано отношение шероховатостей, а именно:

$$F = \frac{R_a^p}{R_a^u}, \quad (1)$$

где R_a^p – шероховатость обработанной поверхности на предыдущей операции, мкм; R_a^u – шероховатость обрабатываемой поверхности, мкм; F – относительный критерий оценки эффективности фрезерования по шероховатости.

Значения критерия F лежат в пределах:

$$0 \leq F \leq 1; F \geq 1. \quad (2)$$

Если $F = 1$, то $R_a^p = R_a^u$, качество обработанной и обрабатываемой поверхности не различаются. С другой стороны, механическая обработка резанием подразумевает улучшение качества обрабатываемой поверхности или уменьшение значения шероховатости, что возможно при условии $F \geq 1$. При $0 \leq F \leq 1$ – область критических режи-

мов резания, при которых шероховатость обработанной поверхности больше, чем у обрабатываемой, что недопустимо.

Таким образом, предложенный критерий F (1) позволяет оценить эффективность процесса фрезерования. Значения критерия F дают возможность спрогнозировать в первом приближении значения конечной шероховатости обрабатываемой поверхности.

Для описания критерия F авторами предложены следующие значимые факторы, описывающие исследуемый процесс: D_{fr} – диаметр концевой фрезы, м; l_{fr} – длина режущей кромки фрезы, м; X_s – длина хорды (рис. 3), образованной режущей кромкой фрезы, м; l_s – секундное перемещение зоны контакта с обрабатываемой поверхностью по режущей кромке фрезы (рис. 4) вдоль обрабатываемой поверхности в перпендикулярном направлении относительно направления подачи, м; N – количество режущих кромок фрезы; ω – угловая скорость вращения фрезы, c^{-1} ; S – подача, м/с; t – глубина резания за один технологический проход, м.

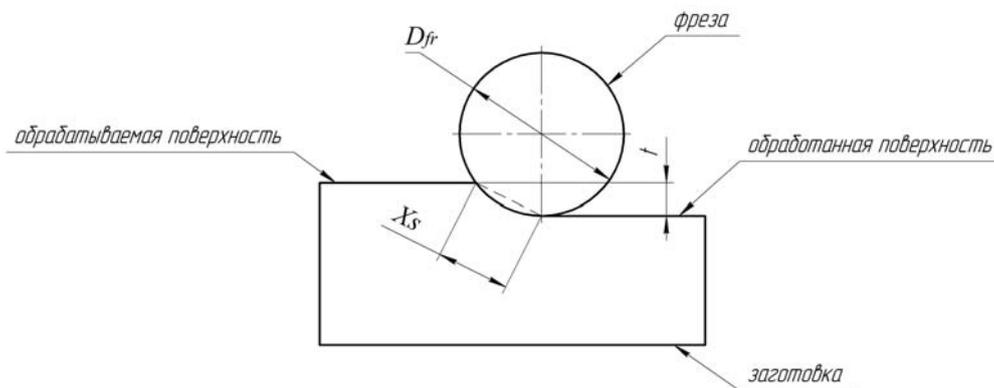


Рис. 3. Взаимное расположение фрезы и обрабатываемой заготовки в процессе фрезерования, X_s – длина хорды

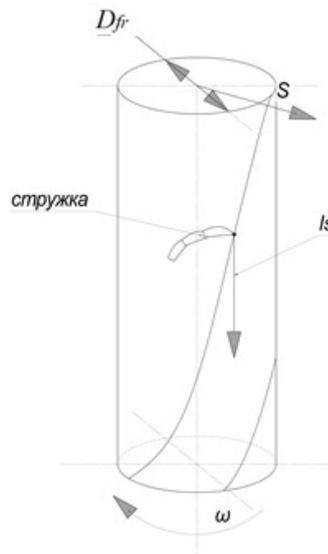


Рис. 4. Секундное перемещение зоны контакта с обрабатываемой поверхностью по режущей кромке фрезы

Путём математических преобразований получена система из восьми характеристических уравнений в безразмерном виде, описывающих динамику процесса резания, режимы резания и составляющие сил резания. Согласно π теореме определитель, составленный из коэффициентов при существенных величинах, отличен от нуля. Тожде-

ственно упростив величины при каждом характеристическом уравнении, система из восьми уравнений свелась к трём, связывающим геометрические параметры режущего инструмента, величину подачи и частоту вращения фрезы. Для дальнейших преобразований авторами выдвинута гипотеза, что значение шероховатости обработанной поверхности зависит от суммарной энергии вращательного движения фрезы вместе с фрезерной головкой, количества образующейся стружки в единицу времени и длины реза режущей кромки в секунду (секундная длина реза). Рассмотрены следующие выражения:

1. Для суммарной энергии вращательного движения фрезы вместе с фрезерной головкой:

$$F = \frac{R_a^p}{R_a^\mu} \approx \frac{mD_{fr}^2}{8} \text{ или } F = \left[\frac{\alpha D_{fr}^2}{8} \right], \quad (3)$$

где α – коэффициент, учитывающий массу m всех вращающихся частей фрезерной головки и фрезы. Размерность коэффициента α – 1/кг. Поскольку на процесс фрезерования оказывает влияние только геометрия и масса фрезы, которая много меньше массы всех вращающихся частей фрезерной головки, в дальнейших расчетах масса в уравнении (3) приравнена к 1. Исследуемый процесс зависит исключительно от геометрии фрезы, а суммарная масса учитывается через коэффициент α .

2. Для количества образующейся стружки в единицу времени:

$$F = \frac{R_a^p}{R_a^\mu} \approx l_{fr} S_t \text{ или } F \approx \left[\frac{\beta}{l_{fr} S_t} \right], \quad (4)$$

где β – коэффициент, учитывающий время образования стружки, сек. Очевидно, что чем большее количество стружки генерирует фреза, тем хуже получается качество обрабатываемой поверхности. По этой причине в уравнении (4) значения F обратно пропорциональны переменным величинам, описывающим исследуемый процесс.

3. Для секундной длины реза:

$$F = \frac{R_a^p}{R_a^\mu} \approx \left[\frac{X_s l_s N \omega}{2l} \gamma \right], \quad (5)$$

где γ – коэффициент, учитывающий время контакта режущей кромки с обрабатываемой поверхностью, 1/сек.

С учётом (3), (4), и (5) окончательно получено выражение:

$$F = \frac{R_a^p}{R_a^\mu} \approx \left[\frac{\alpha D_{fr}^2}{8} \right]^a \left[\frac{\beta}{l_{fr} S_t} \right]^b \left[\frac{X_s l_s N \omega}{2l} \gamma \right]^c. \quad (6)$$

При каждой существенной величине и при каждом выражении в квадратных скобках должен быть свой показатель степени a, b, c . Для определения показателей степеней необходимо проведение экспериментальных исследований. Фрезерование было проведено на отдельных стенках нервюр и балки, изготовленных по технологии послойного выращивания [5 – 7]. Полученные значения шероховатости поверхностей по-

сле фрезерований показали, что предварительные теоретические расчёты по выражению (6) могут быть проведены при показателях степеней равных 1/4, что также является частным случаем и не противоречит теоретическим изысканиям в области теории размерностей. Дополнительно принято, что значения коэффициентов $\gamma = \alpha = \beta = 1$. Учитывая вышеизложенные допущения, после алгебраических преобразований уравнение (6) примет вид:

$$F = \frac{R_a^p}{R_a^\mu} = \sqrt[4]{\frac{D_{fr}^2 X_s l_s N \omega}{16 l_{fr}^2 S_t}} \quad (7)$$

Полученный результат является теоретическим моделированием процесса полустого фрезерования. Геометрические размеры фрез и режимы фрезерования были выбраны согласно рекомендациям [8 – 11]. Подставив численные значения существенных величин в выражение (7) при показателях степеней равных 1, получим:

$D_{fr} = 0,02$ м; $l_{fr} = 0,07$ м; $X_s = 0,0028$ м; $l_s = 0,7$ м; $N = 6$; $\omega = 60$ с⁻¹; $S = 0,008$ м/с; $t = 0,001$ м. При этих параметрах:

$$F = \frac{R_a^p}{R_a^\mu} = \sqrt[4]{\frac{0,02^2 \cdot 0,0028 \cdot 0,7 \cdot 6 \cdot 60}{16 \cdot 0,07^2 \cdot 0,08 \cdot 0,001}} = 2,59 \quad (8)$$

Расчёт показывает, что процесс полустого фрезерования эффективен. Шероховатость обработанной поверхности более чем в 2,5 раза меньше шероховатости обрабатываемой. Значение F – критерия эффективности фрезерования больше 1.

Моделирование для черного фрезерования при уменьшении количества режущих кромок фрезы до $N = 3$ и угловой скорости вращения фрезы до $\omega = 30$ с⁻¹, увеличении величины подачи до $S = 0,016$ м/с, глубины резания до $t = 0,004$ м показало следующее значение F – критерия эффективности фрезерования:

$$F = \frac{R_a^p}{R_a^\mu} = \sqrt[4]{\frac{0,02^2 \cdot 0,0028 \cdot 0,35 \cdot 3 \cdot 30}{16 \cdot 0,07^2 \cdot 0,016 \cdot 0,004}} = 1,62 \quad (9)$$

В этом случае расчёт также прогнозирует эффективность черного фрезерования. Шероховатость обработанной поверхности более чем в 1,5 раза меньше шероховатости обрабатываемой. Значение F – критерия эффективности фрезерования больше 1. В случае дальнейшего снижения частоты вращения фрезы значительно уменьшается значение l_s , что приводит к ситуации, когда значение F – критерия эффективности фрезерования меньше 1, что недопустимо.

Следует отметить, что выражения (3), (4) и (5) имеют размерности при значениях коэффициентов $\alpha, \beta, \gamma = 1$, что на первый взгляд противоречит основным алгоритмам и методикам теории размерностей. Но окончательное уравнение (7) безразмерно. Этот факт позволил авторам связать физические процессы, происходящие в каждом из рассматриваемых симплексов, с окончательным уравнением (7). И тот факт, что значение F в уравнении (7) безразмерно, доказывает правильность теоретических исследований для каждого симплекса.

После проверки синтезированной модели расчётом по формуле (7) на режимах $\omega = 60$ с⁻¹, $S = 0,008$ м/с, $t = 0,001$ м была проведена экспериментальная проверка её

адекватности реальному технологическому процессу при обработке оппозитно расположенными концевыми фрезами $D_{fr} = 0,02$ м, с количеством зубьев 6, соответствующих стенок заготовок нервюр и балки из сплава АК6Т1, изготовленных штамповкой. Полученные значения шероховатости поверхностей после черновой и чистовой обработки представлены на профилограммах (рис. 5 – 7). Замеры шероховатости проводились на профилографе-профилометре HOMMEL–ETAMIC W 20.

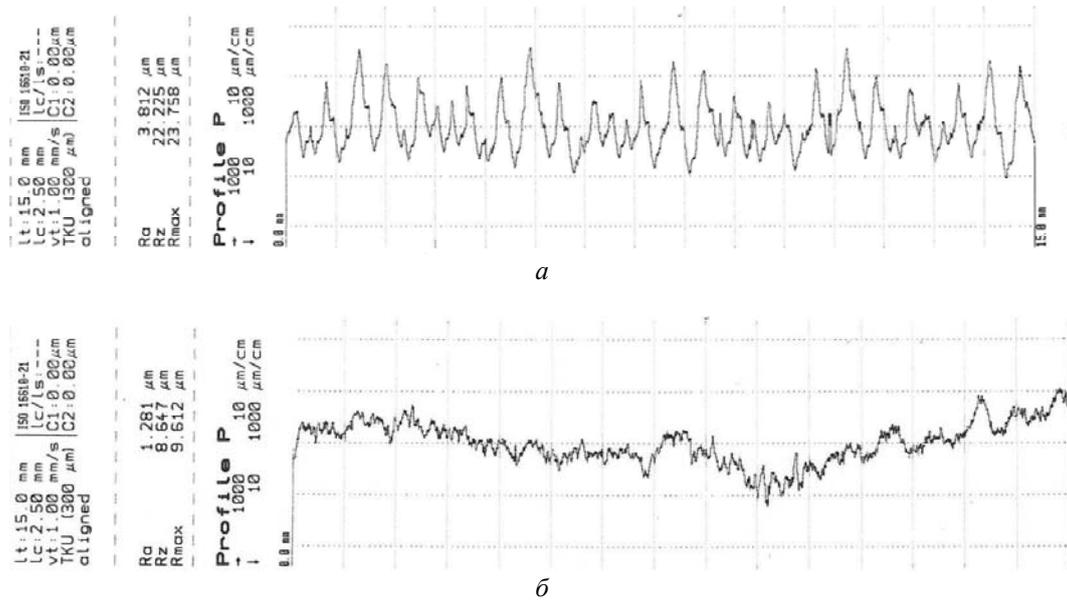


Рис. 5. Профилограмма черновой (а) и чистовой обработки (б) боковой стенки детали «БАЛКА» (Масштаб 1:1)

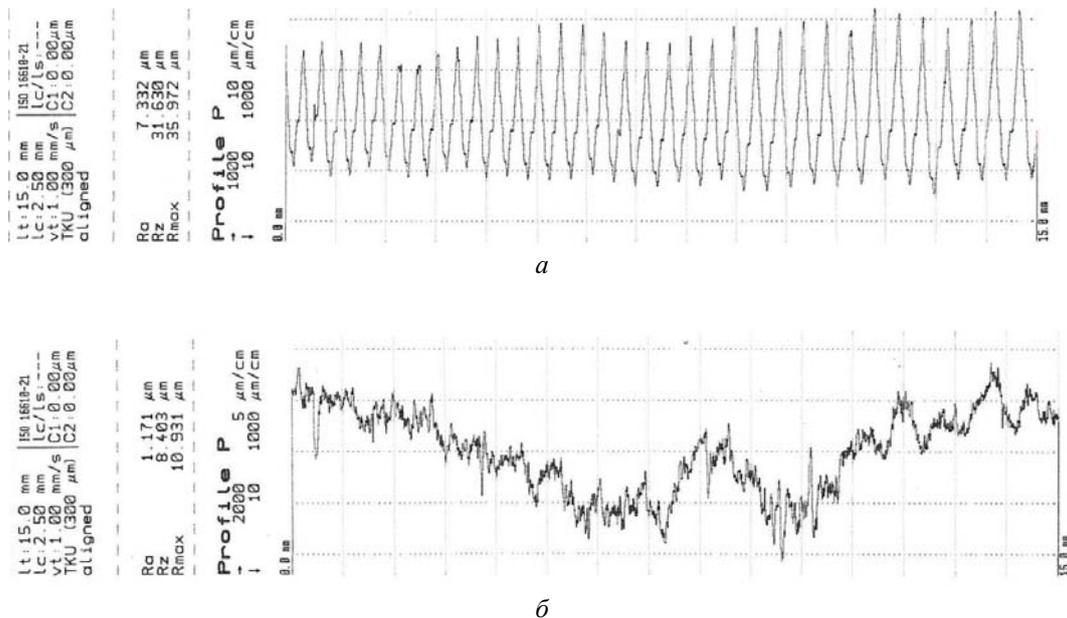


Рис. 6. Профилограмма черновой (а) и чистовой обработки (б) боковой стенки детали «НЕРВИОРА – 1» (Масштаб чистовой обработки 1:1, черновой 1:2)

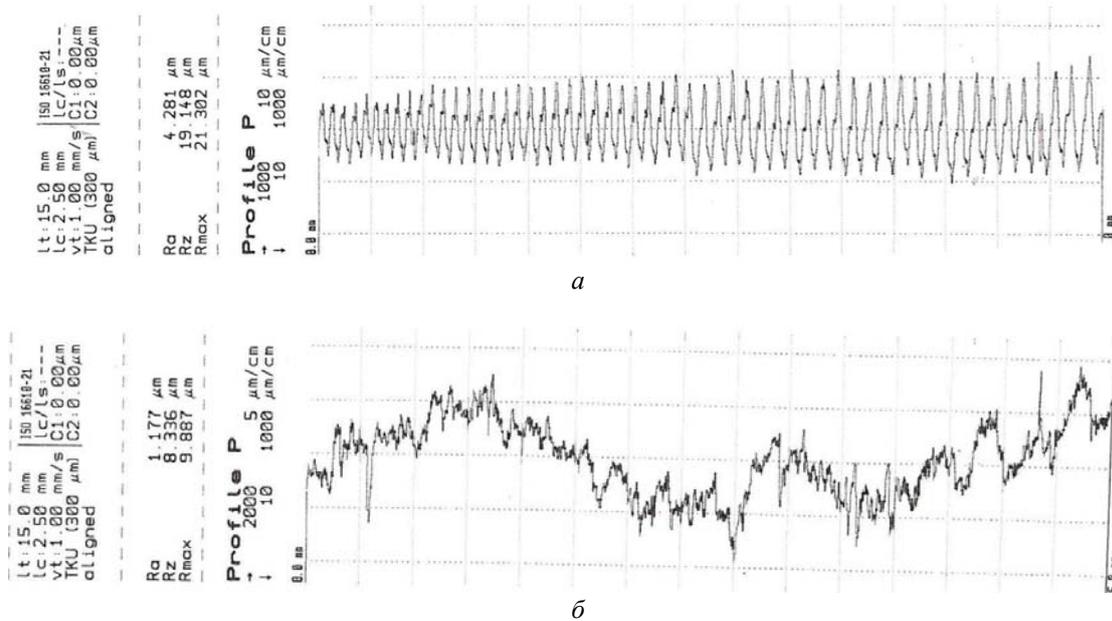


Рис. 7. Профилограмма черновой (а) и чистовой обработки (б) боковой стенки детали «НЕРВЮРА – 2» (Масштаб чистовой обработки 1:1, черновой 1:2)

В результате экспериментальной обработки нервюр и балки получены практические значения шероховатостей обработанных поверхностей, отличающиеся от теоретически рассчитанных по формуле (7) в среднем на 10...15%, что доказывает адекватность разработанной модели.

Для детального, численного прогноза значений F – относительного критерия оценки эффективности фрезерования по шероховатости необходимо на основе многочисленных практических результатов по фрезерованию оппозитно расположенными фрезами определить показатели степеней и значения коэффициентов в формуле (6) для конкретных условий обработки с учётом рекомендаций [12 – 14].

Заключение

Разработана математическая модель, описывающая процесс перспективного для авиационной промышленности процесса фрезерования оппозитно расположенными фрезами. В процессе синтеза модели был применен эвристический подход, сформулирована гипотеза, выявлены значимые факторы процесса резания. В качестве безразмерного критерия оценки качества поверхности предложен критерий F , численно равный отношению шероховатостей обрабатываемой и обработанной поверхностей.

Модель позволяет реализовать прогноз и расчёт значения шероховатостей поверхностей, фрезеруемых оппозитно расположенными фрезами по технологии совмещённого реза. Совмещённый рез позволяет исключить значительное коробление, отжим и снизить шероховатость поверхностей при фрезеровании авиационных деталей. В этом случае исключается отжиг для деталей и заготовок для устранения внутренних напряжений.

Модель позволяет получить прогноз по качеству получаемой поверхности, а также после определения показателей степеней и значений коэффициентов α, β, γ численные значения шероховатостей.

Проведена проверка адекватности синтезированной модели. Относительная погрешность расчётных и практических значений шероховатости составила 10...15%.

Библиографический список

1. Сычев А.К., Михайлов В.К., Семенов В.А., Кульчев В.М., Милехин Е.С., Коротких В.С. Кромкофрезерный станок: патент SU № 1107967; опубл. 15.08.84; бюл. № 30.
2. Шестакова Е.А., Иевлев В.О., Янбаев Р.М., Курьлев Д.В. Синтез слабноагруженной обшивки летательных аппаратов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. Т. 76, № 4. С. 63-66.
3. Клайн С.Дж. Подобие и приближенные методы. М.: Мир, 1968. 304 с.
4. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 430 с.
5. Шестакова Е.А. Повышение качества авиационных деталей, получаемых методом послойного формирования из алюминиевых сплавов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. Т. 76, № 2. С. 87-91.
6. Шестакова Е.А., Янбаев Р.М., Янбаев Ф.М., Галдина А.Ю. Исследование процесса формообразования деталей и заготовок методом послойного наплавления сплавов // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (10-12 августа 2016 г., Казань). Т. 1. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2016. С. 526-533.
7. Шестакова Е.А., Янбаев Р.М., Галдина А.Ю. Высокопроизводительный способ изготовления фасонных деталей типа тел вращения из алюминиевых сплавов: патент РФ № 2707371; опубл. 26.11.2019; бюл. № 33.
8. Руководящие технические материалы РТМ 1311. Подготовка программ для деталей на фрезерных станках с числовым программным управлением. М.: Научно-исследовательский институт технологии и организации производства, 1971. 500 с.
9. Иевлев В.О. Проектирование оптимальных операций фрезерования авиационных деталей. Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Казань, 1989. 32 с.
10. Козлов С.В., Ширшов Е.О. Исследование динамики фрезерования тонкостенных элементов деталей // Инновации в науке. 2019. № 4 (92). С. 29-34.
11. Назаров М.В., Киселев Е.С. Фрезерование тонкостенных заготовок из алюминиевых сплавов при учёте условий жёсткости и автоматизации назначения элементов режима обработки на станках с ЧПУ // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6 (146). С. 42-47. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-42-46
12. Старовойтов С.В., Красников И.П., Гайлиш М.Д. Повышение эффективности лезвийной обработки компрессорных лопаток за счёт объёмного строгания // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 1. С. 121-127.
13. Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Шишкин В.М., Газизуллин Р.К. Распространение вибраций в тонкостенных каркасированных конструкциях // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 3. С. 49-54.
14. Кугультинов С.Д., Щенятский А.В., Жилиев А.С. Численный анализ влияния условий механической обработки на напряжённо-деформированное состояние крупногабаритных тонкостенных деталей сложной формы // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16, № 3. С. 17-21. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-17-21

HEURISTIC MODELING OF THE PROCESS OF MILLING AVIATION PARTS WITH OPPOSED END MILLS BY SYNTHESIS OF A PREDICTIVE MODEL

© 2025

E. A. Shestakova Senior Lecturer of the Department of Technology of Mechanical Engineering Production;
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
anburg@mail.ru

V. O. Ievlev Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering Production;
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
voievlev@kai.ru

R. M. Yanbaev Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Technology of Mechanical Engineering Production;
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
ruslan-yanbaev@mail.ru

The paper presents a comparative analysis of existing milling technologies. The influence of the main negative factors affecting the quality of machined surfaces is revealed. Optimal schemes for machining with opposed cutters are proposed. The modeling of milling processes with oppositely located cutters of thin-walled extended aircraft parts is carried out. The process under study is described by the appropriate physical quantities. A system of eight characteristic equations describing the modes and components of cutting forces, as well as the dynamics of the milling process, is considered. A characteristic equation in dimensionless form is obtained, linking the geometric parameters of the cutting tool, the feed rate and the rotation frequency of the cutter. After checking the synthesized mathematical model by calculation, an experimental check of the proposed model for adequacy to the real process was carried out when machining the appropriate walls of blanks of ribs and beams made of aluminum alloy, manufactured by stamping, with oppositely located end mills. The edges of wells and pockets of aircraft parts were machined in small-scale production conditions. Roughness measurements were taken using a profilograph-profilometer. Optimum values of exponents and appropriate coefficients for simplexes of the mathematical model were determined. A comparative analysis of practical indicators and simulated data of the milling process was carried out. The resulting model allows predicting the results of machining by the proposed method with an error of 10...15%.

Thin-walled aircraft parts; aluminum alloy; rib; beam; milling; opposed arrangement of end mills; dimensional theory; cutting forces; wall vibrations

Citation: Shestakova E.A., Ievlev V.O., Yanbaev R.M. Heuristic modeling of the process of milling aviation parts with opposed end mills by synthesis of a predictive model. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 1. P. 174-184. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-174-184

References

1. Sychev A.K., Mikhaylov V.K., Semenov V.A., Kul'chev V.M., Milekhin E.S., Korotkikh V.S. *Kromkofrezernyy stanok* [Edge milling machine]. Patent SU, no. 1107967, 1984. (Publ. 15.08.84, bull. no. 30)
2. Shestakova E.A., Ievlev V.O., Yanbaev R.M., Kurylev D.V. Synthesis of low loaded aircraft skin. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2020. V. 76, no. 4. P. 63-66. (In Russ.)
3. Kline S.J. *Similarity and approximation theory*. McGraw-Hill, 1965. 229 p.
4. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Methods of similarity and dimensions in mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 430 p.

5. Shestakova E.A. Improving the quality of aircraft parts produced by the method of layer-by-layer formation from aluminum alloys. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2020. V. 76, no. 2. P. 87-91. (In Russ.)

6. Shestakova E.A., Yanbaev R.M., Yanbaev F.M., Galdina A.Yu. Issledovanie protsessa formoobrazovaniya detaley i zagotovok metodom posloynogo naplavljeniya splavov. *Sbornik Dokladov Vserossiyskoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii s Mezhdunarodnym Uchastiem «Novye Tekhnologii, Materialy i Oborudovanie Rossiyskoy Aviakosmicheskoy Otrastli» (August, 10-12, 2016, Kazan)*. V. 1. Kazan: Akademiya nauk RT Publ., 2016. P. 526-533. (In Russ.)

7. Shestakova E.A., Yanbaev R.M., Galdina A.Yu. *Vysokoproizvoditel'nyy sposob izgotovleniya fasonnykh detaley tipa tel vrashcheniya iz alyuminievykh splavov* [High-efficiency method of making shaped parts of rotation bodies from aluminium alloys]. Patent RF, no. 2707371, 2019. (Publ. 26.11.2019, bull. no. 33)

8. RTM 1311 Technical Guidance Materials. Preparation of programs for parts using CNC milling machine tools. Moscow: Nauchno-Issledovatel'skiy Institut Tekhnologii i Organizatsii Proizvodstva Publ., 1971. 500 p. (In Russ.)

9. Ievlev V.O. *Proektirovanie optimal'nykh operatsiy frezerovaniya aviatsionnykh detaley*. Avtoref. ... dis. kand. tekhn. nauk [Design of optimal operations of milling aircraft parts. Abstract of dissertation for the Candidate Degree in Science (Engineering)]. Kazan, 1989. 32 p.

10. Kozlov S.V., Shirshov E.O. Investigation of the dynamics of milling thin-walled elements of parts. *Innovatsii v Nauke*. 2019. No. 4 (92). P. 29-34. (In Russ.)

11. Nazarov M.V., Kiselev E.S. Milling of thin walled components from aluminum alloys by considering the conditions of rigidity and automation assignment elements of a cutting mode on CNC machines. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019. No. 6 (146). P. 42-47. (In Russ.). DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-42-46

12. Starovoitov S.V., Krasnikov I.P., Gailish M.D. Improving of the efficiency of compressor blade edge cutting machining due to volumetric planing. *Russian Aeronautics*. 2023. V. 66, Iss. 1. P. 130-137. DOI: 10.3103/s106879982301018x

13. Paimushin V.N., Firsov V.A., Shishkin V.M., Gazizullin R.K. Vibration transmission in thin-wall framed structures. *Russian Aeronautics*. 2022. V. 65, Iss. 3. P. 490-497. DOI: 10.3103/s1068799822030072

14. Kugultinov S.D., Shchenyatskii A.V., Zhilyaev A.S. Numerical analysis of influence of mechanical processing conditions on stress-deformed state of large-size thin-wall complex parts. *Intellektual'nye Sistemy v Proizvodstve*. 2018. V. 16, no. 3. P. 17-21. (In Russ.)