

УДК 621.9.04

doi: 10.18698/0536-1044-2022-2-18-28

Моделирование процесса формообразования лопаток газотурбинных двигателей с внутриоперационной корректировкой параметров резания

И.Ш. Таналин

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

Modeling the Process of Blades Shaping with Intraoperative Correction of Cutting Parameters

I.Sh. Tanalin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

Лопатки газотурбинных двигателей имеют сложную форму профилированной части и низкую жесткость. При изготовлении лопатки возникают погрешности геометрии пера, превышающие допуски ее формы и размеров. Для минимизации этих погрешностей предложена технологическая цепочка механической обработки лопатки на станках с числовым программным управлением с применением адаптивного управления, при котором происходит корректировка различных параметров резания и траектории режущего инструмента для получения требуемой геометрии детали. Использование межоперационного контроля позволяет вычислить корректирующее значение в зависимости от отклонений фактических параметров от номинальных. Создана идеальная математическая модель, которая послужит основой номинальной формы лопатки, а также скорректированная геометрическая модель лопатки для последующей операции. Для расчета корректирующих значений параметров предложено использовать зеркальный и секущий методы. Зеркальный метод состоит в добавлении погрешности, вызванной предыдущим процессом обработки, к текущей номинальной глубине резания. Секущий метод заключается в выражении номинальной глубины резания следующего процесса как суммы номинальной глубины резания предыдущего процесса и корректирующего значения. Использование этих методов позволяет учесть погрешности, возникающие на предыдущих операциях.

Ключевые слова: механическая обработка, лопатка газотурбинного двигателя, адаптивное управление, зеркальный метод, секущий метод

The blades of gas turbine engines have a complex shape of the profiled part and low rigidity. In blade manufacture, there occur feather geometry errors, exceeding the tolerances of feather's shape and dimensions. To minimize these errors, we propose a technological chain of mechanical processing of a blade on adaptively controlled machine tools, in which various cutting parameters and the trajectory of the cutting tool are adjusted to obtain the required geometry of the part. The use of intraoperative control allows calculating the correction value depending on the deviations of the actual parameters from the nominal ones. We built an ideal mathematical model, which will serve as the basis for the nominal shape of the blade, as well as a corrected geometric model of the blade for the subsequent operation. To calculate the correcting values of the parameters, we propose to use the mirror and secant methods. The mirror method consists in adding the error caused by the previous machining

process to the current nominal depth of cut. The secant method is to express the nominal depth of cut of the next process as the sum of the nominal depth of cut of the previous process and the correction value. These methods make it possible to take into account the errors arising from previous operations.

Keywords: machining, gas turbine engine blade, adaptive control, mirror method, secant method

Особенности адаптивного формообразования лопаток. Современное проектирование лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) представляет собой большой объем предварительных вычислений и моделирование аэродинамического профиля пера лопатки. Для эффективной работы рабочего колеса при его проектировании закладываются высокие критерии точности лопаток, что приводит к высоким требованиям к точности изготовления элементов рабочих колес ГТД [1].

Так как перо лопатки имеет сложную форму и низкую жесткость, в процессе изготовления она подвергается случайной деформации под действием переменных сил формообразования; возникают погрешности расположения профиля, превышающие значения допусков их размеров и формы (рис. 1) [2].

Традиционная механическая обработка на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) по-прежнему остается основным производственным решением для крупногабаритных лопаток ГТД в промышленности. Ключевой составляющей здесь является воздействие рабочего инструмента на обрабатываемую поверхность в процессе резания. Суть этого процесса — противодействие между силой резания и жесткостью различных частей технологической системы [3]. Реальные параметры резания не соответствуют идеальным номинальным параметрам, что приводит к возникновению погрешности обработки.

На сегодняшний день выявлена необходимость разработки методов корректировки параметров резания и траектории рабочего инструмента с учетом возникающих погрешностей форм и расположения пера лопатки, которые могут существенно превышать допустимые значения в ходе многооперационной обработки [4].

Существующие методы управления базируются на двух основных стратегиях корректировки [5]. Первая — это корректировка номинальных параметров в результате моделирования погрешностей и прогнозирования

возможных деформаций [6–8]. Другим решением является прогнозирование и минимизация погрешностей на основе анализа сил резания и деформации тонкостенных деталей с помощью метода конечных элементов [9, 10].

Вторая стратегия заключается в корректировке параметров на основе данных межоперационного контроля. Главный принцип состоит в том, чтобы получить геометрию реальной детали, используя различные средства измерения, и сравнить ее с расчетной моделью.

В соответствии с выявленными отклонениями корректируют параметры обработки и траекторию режущего инструмента с применением элементов адаптивного управления, которые позволяют итеративно уменьшить погрешность обработки [11, 12]. Для обновления параметров резания используют нейронные сети, стратегии корректировки до нулевого отклонения; учитывают пространственные ошибки [13–15].

Однако при исследовании новых методов корректировки параметров обработки пера лопаток возникают две главные проблемы. Первая — как создать идеальную математическую модель, которая послужит основой номиналь-

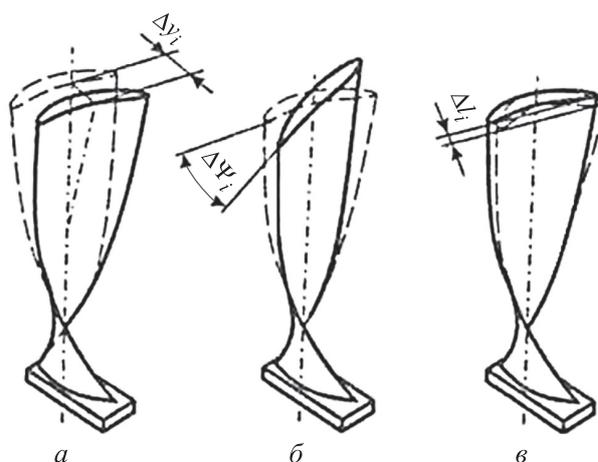


Рис. 1. Схемы формы и расположения профиля крупногабаритных лопаток с различными видами погрешностей:

- a* — увод *i*-го профиля на Δu_i ;
- b* — разворот *i*-го профиля на $\Delta \psi_i$;
- в* — изменение стрелы прогиба *j*-го профиля на Δl_j

ной формы лопатки (и заготовки) на различных стадиях обработки, а также будет способствовать определению схемы обработки ее различных элементов [16, 17].

Вторая проблема заключается в том, как спроектировать скорректированную геометрическую модель лопатки для получения заданного размера. Ввиду возникновения в процессе обработки погрешностей форм и расположения пера реальная геометрическая модель может не соответствовать номинальной расчетной модели. Для минимизации отклонений необходимо корректировать не только параметры резания или траекторию инструмента, но и геометрическую модель заготовки для последующей операции [18].

Цель работы — рассмотреть технологическую цепочку обработки лопаток ГТД, включающую в себя этап корректировки параметров на основе погрешностей, возникающих в результате формообразования. Для нахождения корректирующего значения предлагается использовать зеркальный и секущий методы корректировки.

Концепция корректирующего процесса. Концепция технологической цепочки корректирующего процесса механической обработки заготовки (блок-схема которого приведена на рис. 2) включает в себя основные этапы 3D-моделирования, создание управляющей программы (УП), непосредственно процесс обработки, межоперационный контроль и управляющий блок, который является ядром будущей системы адаптивного управления.

Моделирование лопатки. Проектирование лопатки можно разделить на две предварительные стадии: проектирование сквозного потока и создание 2D- и 3D-моделей лопатки [19]. Предварительную и проточную конструкции применяют для определения средних геометрических характеристик, 2D-модель лопатки — для расчета двумерной формы аэродинамического профиля. Совокупность 2D-моделей в различных сечениях используют для построения 3D-модели лопатки. Математически ее можно описать различными способами (например, методом геометрической параметризации или параболических обводов) [20, 21].

Представление моделируемых поверхностей как квазивинтовых поверхностей подразумевает аппроксимацию образующих кривых полиномами системы ортогональных функций, где коэффициенты выступают в качестве функций координаты z [22]. В этом случае за основу принимают систему координат чертежа детали (рис. 3). Перо лопатки разделяют на N сечений. Для каждого сечения задают m точек с координатами x_{ij}, y_{ij} на корыте и спинке пера, а также радиусы и координаты центров окружностей входной и выходной кромок.

Для каждого j -го сечения строят аппроксимирующие кривые корыта и спинки, находят точки их сопряжения с окружностями кромок. Аппроксимация точек каждого профильного сечения спинки и корыта полиномами n -й степени выглядит следующим образом:

$$y = b_0 + b_1x + \dots + b_nx^n,$$

где b_0, b_1, \dots, b_n — коэффициенты.

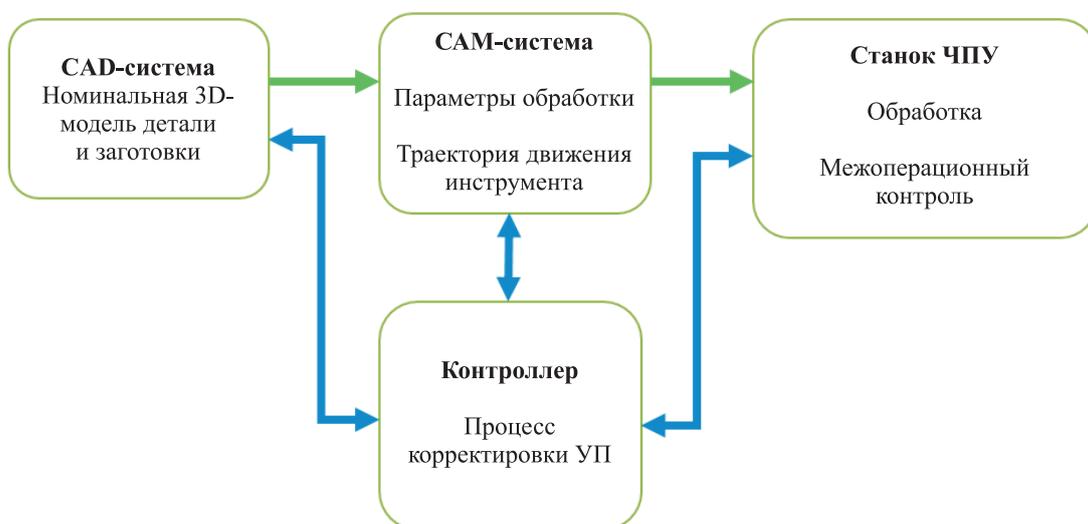


Рис. 2. Блок-схема корректирующего процесса механической обработки заготовки

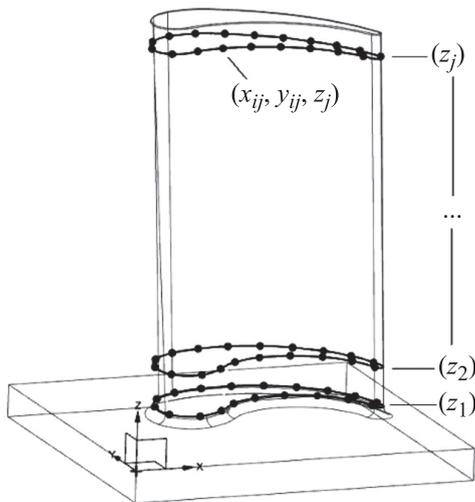


Рис. 3. Модель пера лопатки с заданными опорными точками

Для полной картины обвода профиля стыкуются кривые, аппроксимирующие корыто и спинку, и окружности кромок:

$$\begin{cases} y = b_0 + b_1x + \dots + b_nx^n; \\ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2, \end{cases}$$

где x_0 и y_0 — координаты центра окружностей входной и выходной кромок; R — радиус окружности (рис. 4).

Осуществив аппроксимацию для всех табличных значений z , получают две таблицы коэффициентов b_0, b_1, \dots, b_n для корыта и спинки, а также точки их сопряжения с окружностями кромок (см. рис. 4). Для аналитического описания поверхности пера коэффициенты принимают как функции z .

Интерполяция коэффициентов b_0, b_1, \dots, b_n по z приводит к аналитической формуле, по

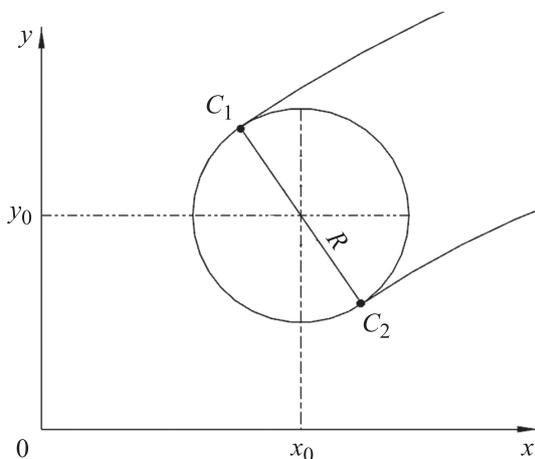


Рис. 4. Модель сопряжения кривых спинок и корыта с окружностями входных и выходных кромок (C_1, C_2 — точки сопряжения)

которой можно найти координаты любой точки поверхности пера лопатки как в базовом, так и в другом промежуточном сечении:

$$y = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^M \alpha_j z^j \right) x^i,$$

где α_j — интерполяция коэффициентов b_0, b_1, \dots, b_n .

Наряду с аппроксимацией точек профиля необходимо интерполировать по z такие величины, как проекции толщины профильного сечения на ось x , наименьшие ординаты профиля, координаты центров и радиусы окружностей входной и выходной кромок, координаты точек сопряжения кромок с образующими спинки и корыта.

Соответствующие координаты опорных точек экспортируются в САД-систему, где строится твердотельная модель детали, в дальнейшем используемая для создания УП.

Создание и внедрение УП на станке с ЧПУ.

Создание УП подразумевает аналитическое определение параметров резания, учитывающее множество факторов: марку обрабатываемого материала, период стойкости фрезы, ширину фрезерования, число зубьев, состояние поверхности и т. д. Так как лопатка имеет сложную криволинейную поверхность, САМ-системы позволяют существенно упростить разработку УП, которую можно представить как сложную функцию с входными и выходными данными.

Входные данные включают в себя характеристики станка, режущего инструмента и заготовки, способ ее фиксации и ориентацию заготовки. В качестве выходных данных выступают параметры резания (глубина t и скорость v резания, подача S) и траектория режущего инструмента. Этап постпроцессирования преобразует выходные данные в полноценную УП в виде универсального G-кода [23].

Далее система управления станка считывает данные с УП и преобразует их в профиль перемещения, который можно представить в виде графика, показывающего в какой точке должен находиться исполнительный орган станка через определенные промежутки времени. В соответствии с профилем перемещения система управления посылает электрический сигнал, который преобразуется в механическое перемещение исполнительных органов станка.

Современные станки с ЧПУ, претендующие на высококачественную обработку, оснащены

серводвигателями, работающими более плавно и точно, чем шаговые электродвигатели. Такие станки дополнительно оборудованы датчиками с обратной связью, контролирующими текущее состояние исполнительных органов в процессе обработки. Это позволяет управляющей системе станка автоматически корректировать положение исполнительных органов в случае их отклонения от требуемой позиции.

Межоперационный контроль. После проведения очередной операции обработки выполняется измерение геометрических параметров полученной поверхности с помощью измерительной системы станка [24]. Для контактной системы важна последовательность измерения с целью получения более точного результата. Отсутствие измерительной системы в станке может привести к увеличению общей трудоемкости изготовления изделия, однако позволит использовать особо точные измерительные системы, которые на сегодняшний день невозможно интегрировать в систему станка.

Для точной реальной модели задаются опорные точки на этапе моделирования в CAD-системе: перо лопатки разделяют на N сечений, а для каждого сечения указывают m точек с координатами (x_{ij}, y_{ij}, z_j) (см. рис. 3).

На этапе межоперационного контроля положение измерительного щупа задается в соответствии с заданными координатами опорных точек для наилучшего совмещения номинальных и реальных точек. На основе полученных данных строится реальная модель детали. Каждое j -е сечение определяется координатами $(x_{ij}^{\phi}, y_{ij}^{\phi})$. Аппроксимация полученных точек

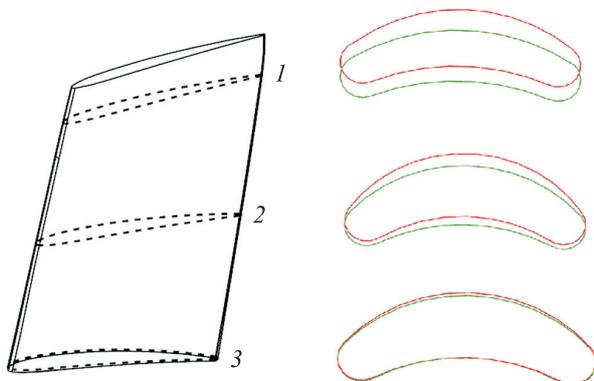


Рис. 5. Модели совмещения профилей номинальной (—) и фактической (—) геометрий пера лопатки:
1, 2 и 3 — верхнее, среднее и нижнее сечение соответственно

приводит к построению фактической геометрии пера лопатки.

При совмещении профилей прослеживается увеличение отклонений от нижнего сечения к верхнему, что вызвано уменьшением жесткости конструкции (рис. 5). Вследствие чего каждое j -е сечение профиля будет иметь свое корректирующее значение.

Корректирующий процесс параметров. Для расчета корректирующих значений параметров используют данные по номинальной модели детали и заготовки, реальную модель детали, полученную после межоперационного контроля, а также составленную по номинальным моделям УП.

Основной принцип адаптивного управления заключается в корректировке параметров на основе возникающих отклонений от номинальных значений. При обработке лопаток отклонения совмещенных профилей могут принимать различные вариации как по геометрическим размерам, так и по форме и расположению профиля (см. рис. 1).

Главная причина возникновения отклонений — наличие остаточных деформаций пера, возникающих на различных этапах технологического процесса изготовления лопатки. Тонкостенные детали демонстрируют низкую жесткость при воздействии сил резания, что приводит к погрешностям. Исходя из закона Гука, деформация детали, вызванная силой резания, определяется выражением

$$\varepsilon = F/K,$$

где F — нормальная сила резания; K — эквивалентная жесткость системы.

В идеальной системе величина срезаемого слоя равна припуску на обработку. Однако в реальной системе вариативность различных факторов добавляет погрешность обработки. Вследствие чего возникают отклонения от номинальных параметров, которые можно представить в виде нелинейной погрешности обработки

$$e(t^h) = \Delta + \varepsilon(t^h) + s(t^h) + \dots,$$

где Δ — расчетный припуск на обработку; t^h — номинальная глубина резания; s — погрешность неупругости и др. (рис. 6, а).

Соотношение между номинальной и реальной глубиной резания t^p можно записать как

$$t^p = f(t^h).$$

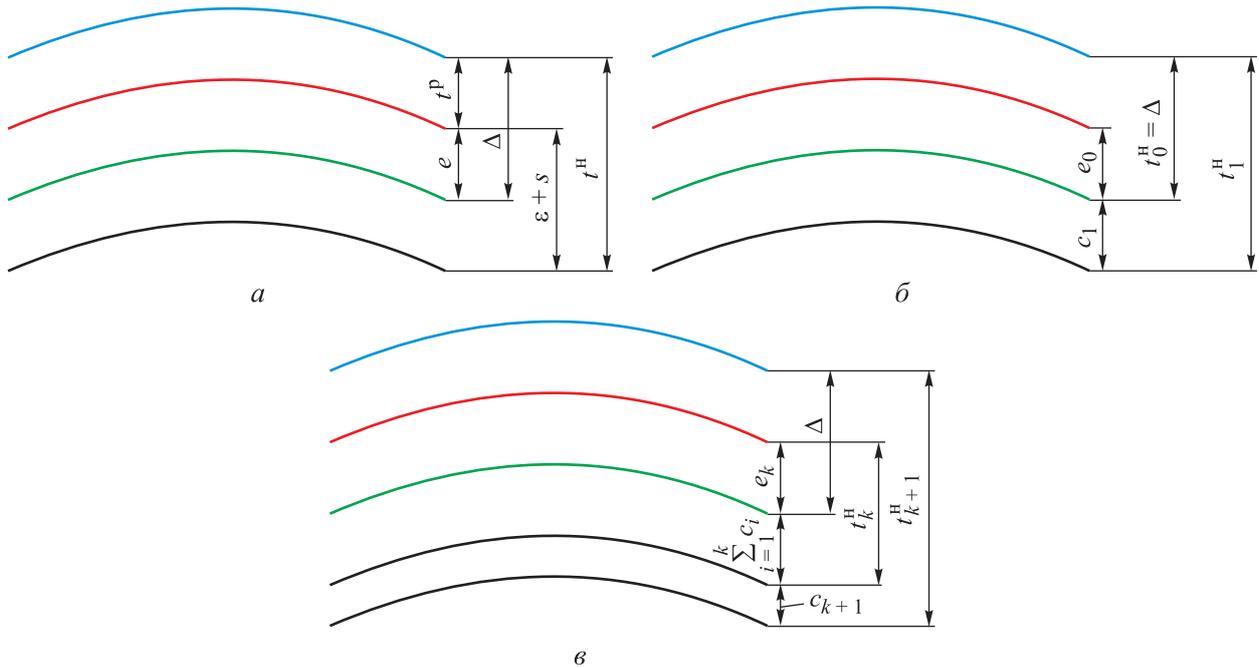


Рис. 6. Модели общей (а), первой (б) и (k + 1)-й (в) корректировок:

— припуск; — отклонение реальной погрешности от номинальной; — номинальная поверхность; — значение корректировки

Тогда погрешность обработки

$$e(t^H) = \Delta - t^P = \Delta - f(t^H).$$

$$\begin{cases} t_0^H = \Delta; \\ t_{k+1}^H = t_k^H + e_k. \end{cases} \quad (2)$$

Корректировка погрешности обработки заключается в подборе такой номинальной глубины резания t^H , чтобы реальная глубина резания t^P равнялась расчетному припуску Δ , а погрешность обработки стремилась к нулю. Для решения нелинейного уравнения целесообразно использовать итерационный метод, основанный на последовательном приближении корректируемых параметров к оптимальным значениям.

Уравнения итерационной корректировки погрешности, представляющие собой общую модель корректировки погрешности, имеют вид

$$\begin{cases} t_0^H = \Delta; \\ t_{k+1}^H = t_k^H + \rho_{k+1}e_k, \end{cases} \quad (1)$$

где k — время (шаг) корректировки; ρ_{k+1} — коэффициент $(k + 1)$ -й корректировки.

Для решения общей модели предложены два метода корректировки.

Зеркальный метод применяют при вычислении корректирующего значения как для прогнозирования погрешности, так и для процесса корректировки после измерений. Суть метода заключается в добавлении погрешности, вызванной предыдущим процессом обработки, к текущей номинальной глубине резания:

Зеркальный метод позволяет контролировать погрешность обработки в нужной области. Из первого уравнения системы (2) следует, что при $k = 0$ процесс не корректируется, номинальная глубина резания $t_0^H = \Delta$ (рис. 6, б). При отсутствии деформации ($t^H = t^P$) идеальная глубина резания будет равна припуску ($t = \Delta$), а погрешность $E = 0$. Однако из-за низкой жесткости и переменности параметров резания реальные значения глубины резания и погрешности примут следующий вид:

$$\begin{aligned} t_0^P &= f(t_0^H) < t; \\ e_0 &= \Delta - t_0^P > E. \end{aligned}$$

Для $(k + 1)$ -й корректировки процесса номинальная глубина резания вычисляется как

$$t_{k+1}^H = \Delta + \sum_{i=0}^k e_i.$$

Если принять, что текущая зависимость между реальной и номинальной глубинами резания такая же, как и предыдущая, то идеальная глубина резания определяется следующим образом:

$$t_{k+1} = t_{k+1}^H \frac{t_k^P}{t_k^H}.$$

Однако даже для идеальной ситуации, когда жесткость не снижается в процессе обработки, идеальная погрешность резания не равна нулю. Кроме того, во время реального процесса жесткость будет падать, а значит, и реальная глубина резания будет меньше, чем идеальная, а реальные погрешности обработки больше идеальной погрешности:

$$\begin{aligned} t_{k+1}^p &< t_{k+1}; \\ e_{k+1} &> E_{k+1}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что небольшая величина корректировки приводит к малому значению сходимости реальных и номинальных значений, а следовательно, и к низкой эффективности резания.

Секущий метод — второй способ корректировки погрешности — заключается в том, что номинальная глубина резания следующего процесса t_{k+1}^n выражается как сумма номинальной глубины резания предыдущего процесса t_k^n и корректирующего значения c_{k+1} (рис. 6, в):

$$\begin{cases} t_0^n = \Delta; \\ t_{k+1}^n = t_k^n + c_{k+1}. \end{cases} \quad (3)$$

Корректирующее значение регулируется в соответствии с реальной погрешностью обработки. Согласно общей модели корректировки (1), можно записать

$$c_{k+1} = \rho_{k+1} e_k,$$

где

$$\rho_{k+1} = \frac{t_k^n}{t_k^p}.$$

Тогда система уравнений (3) приобретает вид

$$\begin{cases} t_0^n = \Delta; \\ t_{k+1}^n = t_k^n + \frac{t_k^n}{t_k^p} e_k. \end{cases}$$

На основе общей модели корректировки погрешности можно представить модель корректировки и перестроения образующих кривых, как показано на рис. 7, где P^H — точка расчетной кривой; P_{ki}^{ck} — скорректированная точка k -го корректирующего процесса. Тогда i -е скорректированные точки кривых можно выразить как

$$P_{ki}^{ck} = P_i^H + \mathbf{n}_{di} (t_{ki}^n - \Delta), \quad i = 0, 1, \dots, m,$$

где \mathbf{n}_{di} — вектор удаления материала; m — общее количество опорных точек измерения.

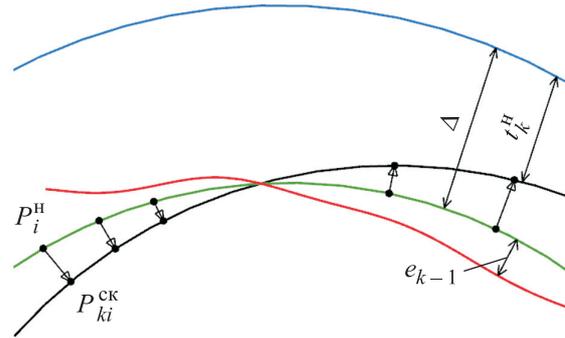


Рис. 7. Модель процесса корректировки опорных точек:

— припуск; — $(k - 1)$ -е отклонение реальной поверхности от номинальной; — номинальная поверхность; — k -я корректировка

При построении относительной кривой на основе скорректированных точек необходимо учитывать, что измеренные точки, как правило, не образуют плавную кривую из-за сопутствующих факторов измерения.

Перерасчет образующих кривых и параметров резания приводит к перенастройке УП, и следующий процесс обработки осуществляется по скорректированным параметрам.

Результат симуляций. В качестве модели для симуляции выбрана геометрия лопатки с расчетным припуском для двух стадий механической обработки. На рис. 8 приведено одно из сечений профиля пера лопатки в системе координат XY, где показаны контуры номинальной детали, номинальные контуры заготовок для чистовой и предчистовой обработки с расчетным припуском 0,4 и 0,8 мм соответственно. На каждом контуре выделены 100 опорных точек для дальнейшего расчета, которые для наглядности соединены штриховыми линиями.

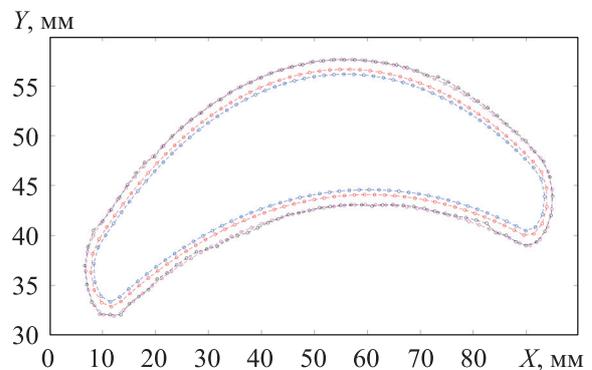


Рис. 8. Модель сечения профиля пера лопатки:

○ — контур номинальной детали; ○ и ○ — номинальный контур заготовки для чистовой и предчистовой обработки; ○ — реальный контур заготовки

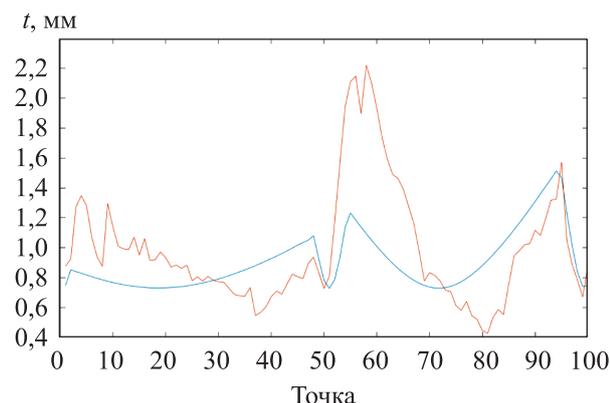


Рис. 9. Результаты расчета значений корректировки глубины резания зеркальным (—) и секущим (—) методами

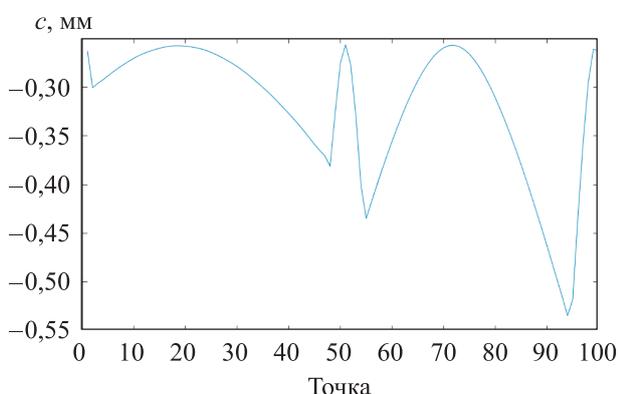


Рис. 10. Результаты расчета коэффициента корректировки

Обработка алгоритма выполнена в программном комплексе MATLAB Simulink. Симуляция включала в себя расчет значения корректировки глубины резания двумя методами. Результаты расчета приведены на рис. 9.

Зеркальный метод дает «резкую» корректировку глубины резания. Это связано с учетом конкретного отклонения от номинальной формы в каждой точке, на которое не влияют отклонения других точек. Секущий метод демонстрирует более сглаживающий эффект: за счет коэффициента корректировки происходит аппроксимация вычисленных отклонений (рис. 10). А конечное значение глубины резания дает лучший результат по достижению номинальной конечной формы.

Литература

- [1] Тихонов Н.Т. *Теория лопаточных машин авиационных газотурбинных двигателей*. Самара, СГАУ, 2001. 154 с.
- [2] Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Юнусов Ф.С. *Адаптивное формообразование лопаток шлифованием*. Казань, Изд-во КГТУ, 2002. 135 с.

Выводы

1. Для осуществления корректирующего процесса, который учитывает возникающие при изготовлении лопаток ГТД погрешности форм и расположения пера, предложена технологическая цепочка их обработки, включающая в себя следующие этапы:

- моделирование геометрии лопаток и заготовок на основе математического описания поверхности в CAD-системе;
- составление УП механической обработки детали в САМ-системе;
- механическая обработка детали на станке с ЧПУ;
- межоперационный контроль обработанной детали с последующим созданием математической модели фактической геометрии поверхности;
- вычисление возникших погрешностей путем сравнения номинальной и фактической геометрий; расчет корректирующего значения параметров резания и траектории рабочего инструмента с возможным перестроением геометрии обрабатываемой поверхности;
- механическая обработка детали на станке с ЧПУ по откорректированной УП.

2. Расчет значений корректировки параметров резания следует проводить с помощью двух методов:

- зеркального, заключающегося в добавлении погрешности, вызванной предыдущим процессом обработки, к текущей номинальной глубине резания;
- секущего, при котором номинальная глубина резания следующего процесса выражается как сумма номинальной глубины резания предыдущего процесса и корректирующего значения.

3. Движение режущего инструмента можно представить в виде профиля перемещения, который зависит и от глубины резания. Вычислив значение корректировки глубины резания с помощью предложенных методов, можно скорректировать профиль перемещения для уменьшения погрешности обработки и повышения точности изготовления детали.

- [3] Грановский Г.И., Грановский В.Г. *Резание металлов*. Москва, Высшая школа, 1985. 304 с.
- [4] Таналин И.Ш. *Прогрессивные технологии изготовления лопаток газотурбинных двигателей*. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2020, т. 76, № 3, с. 50–55.
- [5] Костенко Ю.Т., Любчик Л.М. *Системы управления с динамическими моделями*. Харьков, Основа, 1996. 212 с.
- [6] Aguado S., Santolaria J., Samper D. et al. Improving a real milling machine accuracy through an indirect measurement of its geometric errors. *J. Manuf. Syst.*, 2016, vol. 40, no. 1, pp. 26–36, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.05.006>
- [7] Hu Q., Chen Y., Yang J. On-line contour error estimation and control for corner smoothed five-axis tool paths. *Int. J. Mech. Sci.*, 2020, vol. 171, art. 105377, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105377>
- [8] Rao V.S., Rao P.V.M. Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2006, vol. 46, no. 15, pp. 2036–2043, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.01.004>
- [9] Ratchev S., Liu S., Huang W., et al. An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2006, vol. 46, no. 5, pp. 542–551, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.06.003>
- [10] Wang M.H., Sun Y. Error prediction and compensation based on interference-free tool paths in blade milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 71, no. 5–8, pp. 1309–1318, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5535-3>
- [11] Fiorentino A., Feriti G.C., Giardini C., et al. Part precision improvement in incremental sheet forming of not axisymmetric parts using an artificial cognitive system. *J. Manuf. Syst.*, 2015, vol. 35, pp. 215–222, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.003>
- [12] Wu D., Wang H., Zhang K., et al. Research on adaptive CNC machining arithmetic and process for near-net-shaped jet engine blade. *J. Intell. Manuf.*, 2020, vol. 31, no. 3, pp. 717–744, doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01474-z>
- [13] Cho M.W., Kim G.H., Seo T.L., et al. Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2006, vol. 46, no. 12–13, pp. 1417–1427, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.002>
- [14] Poniatowska M. Free-form surface machining error compensation applying 3D CAD machining pattern model. *Comput. Aided Des.*, 2015, vol. 62, pp. 227–235, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.12.003>
- [15] Haeussinger C., Brunner L., Martinier A., et al. On-machine measuring method for the reconstruction of additively manufactured near-net shaped parts. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 92, pp. 175–180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.186>
- [16] Huang N., Bi Q., Wang Y., et al. 5-axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2014, vol. 84, pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.04.004>
- [17] Altintas Y., Tuysuz O., Habibi M., et al. Virtual compensation of deflection errors in ball end milling of flexible blades. *CIRP Annals*, 2018, vol. 67, no. 1, pp. 365–368, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.03.001>
- [18] Dong Y., Zhang D., Bu K., et al. Geometric parameter-based optimization of the die profile for the investment casting of aerofoil-shaped turbine blades. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2011, vol. 57, no. 9–12, pp. 1245–1258, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3681-z>
- [19] Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. *Газотурбинные двигатели*. Пермь, Авиадвигатель, 2006. 1204 с.
- [20] Zhang Y., Chen Z.T., Ning T. Reverse modeling strategy of aero-engine blade based on design intent. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, vol. 81, no. 9, pp. 1781–1796, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7232-x>
- [21] Виноградов Л.В., Костюков А.В. Автоматизированное проектирование лопаток турбин с параболическими обводами. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2013, т. 1, № 1, с. 41–47.
- [22] Юнусов Ф.С. *Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием*. Москва, Машиностроение, 1987. 248 с.
- [23] Ведмидь П.А., Сулинов А.В. *Программирование обработки в NX CAM*. Москва, ДМК Пресс, 2014. 304 с.

- [24] Ловыгин А.А., Теверовский Л.В. *Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система*. Москва, ДМК Пресс, 2017. 280 с.

References

- [1] Tikhonov N.T. *Teoriya lopatochnykh mashin aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Theory of blade machines for aircraft gas-turbine engines]. Samara, SGAU Publ., 2001. 154 p. (In Russ.).
- [2] Lunev A.N., Moiseeva L.T., Yunusov F.S. *Adaptivnoe formoobrazovanie lopatok shlifovaniem* [Adaptive shaping of blades by grinding]. Kazan', Izd-vo KGTU Publ., 2002. 135 p. (In Russ.).
- [3] Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 304 p. (In Russ.).
- [4] Tanalin I.Sh. Advanced manufacturing technology for gas turbine engine blades. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva* [Vestnik KNRTUn.a. A.N. Tupolev], 2020, vol. 76, no. 3, pp. 50–55. (In Russ.).
- [5] Kostenko Yu.T., Lyubchik L.M. *Sistemy upravleniya s dinamicheskimi modelyami* [Control systems with dynamic models]. Khar'kov, Osnova Publ., 1996. 212 p. (In Russ.).
- [6] Aguado S., Santolaria J., Samper D., et al. Improving a real milling machine accuracy through an indirect measurement of its geometric errors. *J. Manuf. Syst.*, 2016, vol. 40, no. 1, pp. 26–36, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.05.006>
- [7] Hu Q., Chen Y., Yang J. On-line contour error estimation and control for corner smoothed five-axis tool paths. *Int. J. Mech. Sci.*, 2020, vol. 171, art. 105377, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105377>
- [8] Rao V.S., Rao P.V.M. Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2006, vol. 46, no. 15, pp. 2036–2043, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.01.004>
- [9] Ratchev S., Liu S., Huang W., et al. An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2006, vol. 46, no. 5, pp. 542–551, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.06.003>
- [10] Wang M.H., Sun Y. Error prediction and compensation based on interference-free tool paths in blade milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 71, no. 5–8, pp. 1309–1318, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5535-3>
- [11] Fiorentino A., Feriti G.C., Giardini C., et al. Part precision improvement in incremental sheet forming of not axisymmetric parts using an artificial cognitive system. *J. Manuf. Syst.*, 2015, vol. 35, pp. 215–222, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.003>
- [12] Wu D., Wang H., Zhang K., et al. Research on adaptive CNC machining arithmetic and process for near-net-shaped jet engine blade. *J. Intell. Manuf.*, 2020, vol. 31, no. 3, pp. 717–744, doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01474-z>
- [13] Cho M.W., Kim G.H., Seo T.L., et al. Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2006, vol. 46, no. 12–13, pp. 1417–1427, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.002>
- [14] Poniatowska M. Free-form surface machining error compensation applying 3D CAD machining pattern model. *Comput. Aided Des.*, 2015, vol. 62, pp. 227–235, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.12.003>
- [15] Haeussinger C., Brunner L., Martiner A., et al. On-machine measuring method for the reconstruction of additively manufactured near-net shaped parts. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 92, pp. 175–180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.186>
- [16] Huang N., Bi Q., Wang Y., et al. 5-axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2014, vol. 84, pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.04.004>
- [17] Altintas Y., Tuysuz O., Habibi M., et al. Virtual compensation of deflection errors in ball end milling of flexible blades. *CIRP Annals*, 2018, vol. 67, no. 1, pp. 365–368, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.03.001>
- [18] Dong Y., Zhang D., Bu K. et al. Geometric parameter-based optimization of the die profile for the investment casting of aerofoil-shaped turbine blades. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2011, vol. 57, no. 9–12, pp. 1245–1258, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3681-z>

- [19] Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. *Gazoturbinnnye dvigateli* [Gas-turbine engines]. Perm', Aviadvigatel' Publ., 2006. 1204 p. (In Russ.).
- [20] Zhang Y., Chen Z.T., Ning T. Reverse modeling strategy of aero-engine blade based on design intent. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, vol. 81, no. 9, pp. 1781–1796, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7232-x>
- [21] Vinogradov L.V., Kostyukov A.V. Computer-aided designing of turbine blades with parabolic contours. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.).
- [22] Yunusov F.S. *Formoobrazovanie slozhnoprofil'nykh poverkhnostey shlifovaniem* [Shaping of figurine surfaces by grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 248 p. (In Russ.).
- [23] Vedmid' P.A., Sulinov A.V. *Programirovanie obrabotki v NX CAM* [Programming of processing with NX CAM]. Moscow, DMK Press Publ., 2014. 304 p. (In Russ.).
- [24] Lovygin A.A., Teverovskiy L.V. *Sovremennyy stanok s ChPU i CAD/CAM sistema* [Up-to-date CNC machine and CAD/CAM system]. Moscow, DMK Press Publ., 2017. 280 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 04.10.2021

Информация об авторе

ТАНАЛИН Ильнур Шамилевич — аспирант кафедры «Технология машиностроительных производств». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 55, e-mail: tanalin.ilnur@gmail.com).

Information about the author

TANALIN Ilnur Shamilevich — Postgraduate, Department of Technology of Engineering Production. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420015, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St. 5, Bldg. 55, e-mail: tanalin.ilnur@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Таналин И.Ш. Моделирование процесса формообразования лопаток газотурбинных двигателей с внутриоперационной корректировкой параметров резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 2, с. 18–28, doi: 10.18698/0536-1044-2022-2-18-28

Please cite this article in English as:

Tanalin I.Sh. Modeling the Process of Blades Shaping with Intraoperative Correction of Cutting Parameters. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 2, pp. 18–28, doi: 10.18698/0536-1044-2022-2-18-28