

Применение дискретно-континуальных 3D-моделей кластеров блокирующих контуров при проектировании технологических маршрутов обработки лопаток моноколес компрессоров и турбин ГТД

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Рассмотрены вопросы применения дискретно-континуальных 3D-моделей кластеров блокирующих контуров для комплексной структурно-параметрической оптимизации технологических маршрутов механической обработки лопаток моноколес компрессоров и турбин газотурбинных двигателей. Усовершенствованы логико-математические модели плоских блокирующих контуров при их использовании для локальной параметрической оптимизации отдельных технологических операций, путем ввода ограничений на параметры режимов резания в целях нахождения нормируемых показателей точности в пределах установленных допусков и обеспечения заданной производительности обработки. Показана возможность выбора предельно эффективных маршрутов, режимов резания и допусков на базовые поверхности заготовок с применением этих моделей.

Ключевые слова: дискретно-континуальные 3D-модели, кластеры блокирующих контуров, процессы механической обработки, лопатки ГТД, оптимизация.

Станкостоемость механической обработки моноколес турбин и компрессоров ГТД имеет значения составляет, как правило, более 200 часов. Ее снижение в значительной мере достигается за счет комплексной оптимизации, предусматривающей выбор предельно эффективных технологических маршрутов (ТМ), режимов резания и допусков на базовые поверхности заготовок. Однако задача комплексной оптимизации не имеет аналитического решения. Для получения искомых результатов необходимо применять специальные модели и методы. Одним из них является метод, основанный на использовании дискретно-континуальных 3D-моделей кластеров блокирующих контуров (БК).

Применительно к рассматриваемому случаю БК будем называть область пространства, ограниченную линиями, которые отсекают те значения технологических параметров, которые недопустимы при выполнении процесса резания с учетом существующих ограничений. Значения технологических параметров внутри контура, являются допустимыми. Каждой технологической операции соответствует свой БК, и каждое сочетание технологических параметров внутри БК определяет значение критерия эффективности.

Целью данной статьи является разработка обобщенных дискретно-континуальных 3D-моделей кластеров блокирующих контуров для выбора оптимальных режимов обработки по каждой операции таким образом, чтобы было получено обеспечивалось экстремальное значение критерия оптимальности технологического процесса (ТП) в целом.

Метод БК был впервые применен в алгоритмах расчетов коэффициентов корригирования зубчатых колес еще в середине прошлого века [12], а затем получил распространение в других областях техники, в том числе в технологии машиностроения и двигателестроения [2 - 5, 8, 9]. Однако в опубликованных работах БК используют для оптимизации отдельных операций без учета ограничений по точ-

ности изделий, что не позволяет выполнить комплексную структурно-параметрическую оптимизацию ТП.

Задача комплексной структурно-параметрической оптимизации ТП в общем виде может быть представлена следующей системой логико-математических зависимостей [2, 13,14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{W} = \bar{W}(W_1(Z), W_2(Z) \dots W_n(Z)); \\ \bar{W}(t, \bar{Z}, u_k) \Rightarrow \bar{W}(t)_{opt}, u_k = \sum_{\xi=1}^l f_k(\delta_{\xi} u_{k\xi}); \\ \delta_{\xi}(t) \in \{0,1\}; \\ \bar{Z} = \Phi_O(t, \bar{Y}, u_o), u_o = \sum_{\eta=1}^p f_o(\delta_{\eta} u_{o\eta}); \\ \delta_{\eta}(t) \in \{0,1\}; \\ \bar{Y} = \Phi_{II}(t, \bar{x}, u_n), u_n = \sum_{\tau=1}^q f_n(\delta_{\tau} u_{n\tau}); \\ \delta_{\tau}(t) \in \{0,1\}; \\ Al_i^-(|S_{\Sigma}|, \bar{\Pi}, t) \leq Al_i(|S_{\Sigma}|, \bar{\Pi}, t) \leq Al_i^+(|S_{\Sigma}|, \bar{\Pi}, t); \\ i \in \{1, L\}; \\ \Phi_j^-(|S_{\Sigma}|, \bar{\Pi}, t) \leq \Phi_j(|S_{\Sigma}|, \bar{\Pi}, t) \leq \Phi_j^+(|S_{\Sigma}|, \bar{\Pi}, t); \\ j \in \{1, m\}; \\ \bar{\Pi}_{ijk}^- \leq \bar{\Pi}_{ijk} \leq \bar{\Pi}_{ijk}^+; \\ k \in \{1, n\}; \\ \bar{\Pi} \in \{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где W – вектор-критерий оптимальности на уровне надсистемы;

t – время;

$z_1, z_2 \dots z_k$ – параметры на уровне надсистемы;

ξ, l – индекс и предел суммирования управляющих воздействий на уровне надсистемы соответственно;

$u_{k\xi}$ – ξ -е управляющее воздействие на уровне надсистемы;

u_k – суммарное управляющее воздействие на уровне надсистемы;

Z – вектор-критерий оптимальности на уровне системы;

$y_1, y_2 \dots y_o$ – параметры на уровне системы;

η, p – индекс и предел суммирования управляющих воздействий на уровне системы соответственно;

$u_{\eta o}$ – η -е управляющее воздействие на уровне системы;

u_o – суммарное управляющее воздействие на уровне системы;

Y – вектор-критерий оптимальности на уровне подсистемы;

$x_1, x_2 \dots x_n$ – параметры на уровне подсистемы;
 t, q – индекс и предел суммирования управляющих воздействий на уровне подсистемы соответственно;
 u_{tn} – t -е управляющее воздействие на уровне подсистемы;
 u_n – суммарное управляющее воздействие на уровне подсистемы;
 \bar{d}_g – последовательности введения управляющих действий;
 f_k, f_o, f_n – функциональные зависимости управляющих воздействий;
 AI – знак, обозначающий алгоритм для определения числовых характеристик ограничений и допусков на них;
 i – уровень иерархии;
 L – количество подсистем;
 Φ_o, Φ_n – функциональные зависимости, отражающие выбранные критерии оптимальности на уровне системы и подсистемы соответственно;
 j – номер функционального ограничения;
 m – количество функциональных ограничений;
 Φ_j – функциональная зависимость, отражающая j -е функциональное ограничение на параметры;
 $|S_{\bar{x}}|$ – структура подсистемы;
 Π – вектор параметров;
 k – индекс, обозначающий надсистему;
 o – индекс, обозначающий систему;
 n – индекс, обозначающий подсистему;
 opt – оптимальное значение параметра;
 \llcorner – индекс, обозначающий нижний допуск на параметр;
 $\llcorner+$ – индекс, обозначающий верхний допуск на параметр.

Зависимости, входящие в систему (1), подлежат конкретизации. В качестве векторов-критериев оптимальности (1) в условиях рыночной экономики применяются векторы, характеризующие показатели, связанные с производительностью, которая определяет в конечном счете себестоимость обработки моноколес. В данном случае рассматриваем аддитивный критерий, соответствующий наименьшей суммарной станкочемкости ТП. Это требует, чтобы при выполнении каждой операции, входящей в i -й ТМ, было минимальное машинное время, линейно зависящее от минутной подачи.

Поскольку каждый БК как плоский инструмент поиска предельных значений критерия оптимальности соответствует конкретной технологической операции, то для оптимизации ТП необходимы кластеры БК, отражающие ограничения на каждой операции. Дискретность операций ТМ, в пределах которых технологические параметры изменяются непрерывно, определяет необходимость использования дискретно-континуальных 3D-моделей кластеров БК.

Для построения БК необходима конкретизация ограничений (1). Это может быть достигнуто путем использования известных зависимостей из работ [1, 3, 9]. При необходимости эти зависимости могут быть получены путем дополнительных исследований процессов механической обработки, например, как это сделано в работах [6, 9].

Процедура оптимизации выполняется путем последовательного перебора упорядоченных вариантов $TM_h, h \in \{1, 2, \dots, N\}$, для каждого из которых должны быть построены кластеры БК, соответствующие конкретным технологическим операциям, и определено расчетное значение критерия оптимальности. На рис. 1 и 2 показаны кластеры БК, отражающие ТМ, состоящие из черновых,

получистовых и финишных операций. Знак Π_k обозначает производительность TM_k как критерия оптимальности.

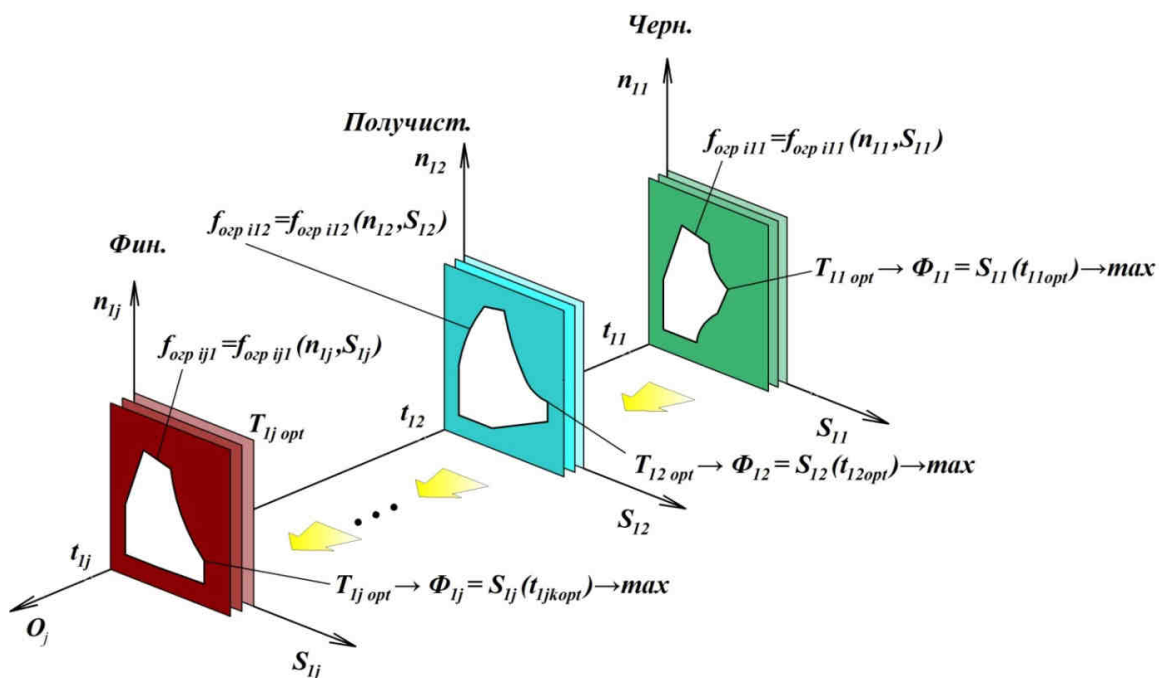


Рис.1 Схема объемного структурно-дискретного БК ТП

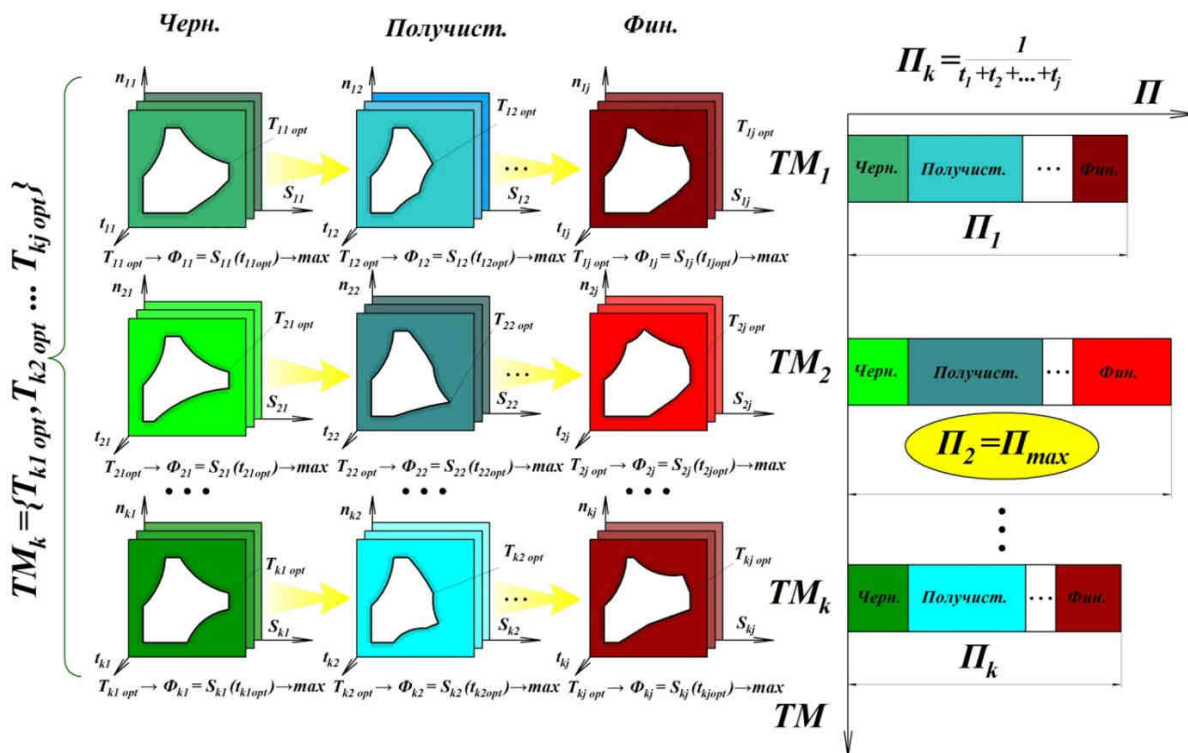


Рис. 2 Кластер вариантов объемных структурно-дискретных БК вариантов ТМ

Поскольку БК для каждой операции представляют собой плоские изображения областей допустимых параметрических решений (как правило, в координатах показатель скорости – показатель подачи), то их кластер, изображенный в аксонометрии, будет представлять собой объемный структурно-дискретный БК ТП, схема которого показана на рис. 1. Кластер объемных структурно-дискретных БК вариантов синтезированных ТП позволяет найти комплексно оптимальное решение (рис. 2).

Указанная процедура позволяет получить оптимальное проектное решение. Однако окончательный выбор оптимального варианта зависит не только от расчетного значения критерия оптимальности, но и от оперативно складывающейся обстановки на производственных участках (реальной точности того или иного оборудования, его загрузки т.д.) которые являются организационно-техническими ограничениями. Поэтому кроме проектной оптимизации, выполняемой на стадии разработки ТП, необходимо оперативно оптимизировать маршруты обработки на этапе управления производственным циклом [13]. Вместе с тем проектная оптимизация типовых ТМ обработки поверхностей лопаток моноколес ГТД, а также практика их производства показывают, что изменение ТМ приводит к необходимости принципиального изменения станочного парка, поскольку возможен значительный рост производительности (например, в случае применения битангенциального формообразования – в 15 раз [4, 11], многоинструментной обработки – в 3 и более раз [9]). Это указывает на необходимость упреждающей модернизации производства по мере развития научно-технического прогресса. Это приобретает особую актуальность в связи с предстоящим переходом к изготовлению двигателей 5-го поколения, которые должны содержать основные детали из композиционной керамики. Изготовление таких деталей структурно упрощает ТМ, но приводит к значительному усложнению средств технологического оснащения и, в ряде подготовительных операций – к значительному увеличению станкостоемости.

В связи с тем, что оптимальное решение для каждого варианта $ТМ_n$ по основным параметрам, определяющим точность и производительность обработки, находится на границе области допустимых значений параметров, необходимы методы направленного поиска оптимального решения.

В качестве примера приведем вариант построения блокирующего контура для операции чистовой обработки моноколеса ГТД.

Варьируемыми параметрами режимов резания выбраны $X_1 = n$ – частота вращения шпинделя станка и $X_2 = S$ – минутная подача инструмента. По сравнению с исходными данными работы [9] были введены дополнительные ограничения на параметры X_1 и X_2 из условия обеспечения нормируемых показателей точности и общей производительности ТП.

Условия обеспечения требуемой точности [10] с учетом модели жесткости лопатки и расчетной схемы (рис. 3), представлены следующими зависимостями:

$$P_y \left(\frac{1}{C_{изг.n}} + \frac{(B_n - e_n)^2 \cdot h_n}{G \cdot J_{pn}} \right) \leq \frac{[\Delta x]}{\cos \gamma_{nn}} - (\Delta_k + \Delta_{изн} + \Delta_t) - e_2, \quad (2)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания;

$[\Delta x]$ – допуск на отклонение входной кромки по оси X [6];

$C_{изг.n}$ – жесткость лопатки в периферийном сечении;

$\Delta_k, \Delta_{изн}, \Delta_t$ – составляющие суммарной погрешности профиля, вызванные кинематическими погрешностями станка, износом инструмента и температурным расширением соответственно;

e_2 – эксцентриситет установки заготовки моноколеса на оправке;

$B_n, \gamma_{ин}, e_n$ – хорда, угол поворота профиля и смещение центра жесткости по отношению к центру периферийного сечения лопатки;

J_{pn} – полярный момент инерции периферийного сечения лопатки;

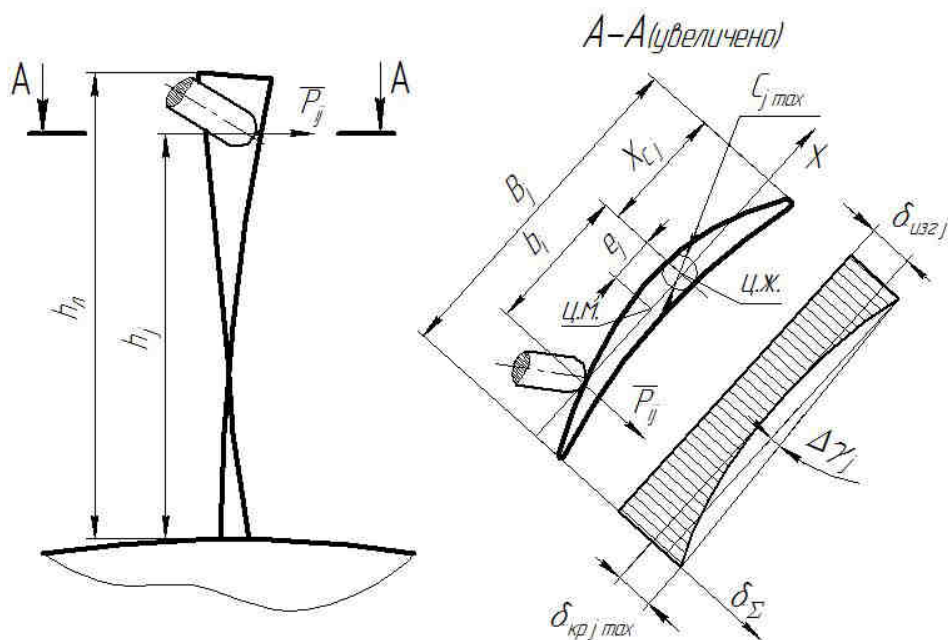


Рис. 3 Расчетная схема для определения ограничений максимального отклонения профиля на сторону и погрешности угла разворота профиля, вызванных упругими деформациями лопатки под воздействием силы резания

$$P_y \left(\frac{1}{C_{изг.n}} + \frac{(B_n - e_n)^2 \cdot h_n}{G \cdot J_{pn}} \right) \leq [\delta] - (\Delta_k + \Delta_{изн} + \Delta_t) - e_2, \quad (3)$$

где $[\delta]$ – допуск на величину отклонения профиля на сторону;

$$\frac{P_y \cdot ((B_n - e_n)^2 - e_n^2) \cdot h_n}{G \cdot J_{pn}} \leq [\Delta\gamma] - \frac{TCA}{D_B} - (\Delta\gamma_k + \Delta\gamma_{изн} + \Delta\gamma_t), \quad (4)$$

где $[\Delta\gamma]$ – допуск на величину погрешности угла разворота профиля [6];

$\Delta\gamma_{изн}, \Delta\gamma_t, \Delta\gamma_k$ – составляющие суммарной погрешности угла разворота профиля, являющиеся следствием кинематических погрешностей станка, износа инструмента и температурного расширения соответственно;

TCA – торцевое биение заготовки;

D_B – базовый диаметр при установке заготовки моноколеса на оправке;

$$[t]^- \leq t_{II} + \frac{L_{\text{конт}}}{S_{\text{мин}} \cdot N_{\text{станков}}} + t_3, \quad (5)$$

где t_n, t_3 – подготовительное и заключительное время соответственно;

$L_{\text{конт}}$ – длина траектории инструмента в пределах операции;

$N_{\text{станков}}$ – количество одновременно работающих станков;

$[t]^-$ – ограничение времени обработки.

Ограничение температуры заготовок из титановых сплавов в зоне обработки с учетом аппроксимированных данных, полученных в работе [15] имеет вид

$$T_{zp} = -0,03 \cdot V^2 + 3,56 \cdot V + 84 \leq [T_{zp}]. \quad (6)$$

При конкретизации зависимостей (2) – (6) принято: $C_{\text{изг.п}}=13,3$ кг/мм; $\Delta_k + \Delta_{\text{изг}} + \Delta_f=0,061$ мм [6]; $e_2=0,03$ мм; TCA= 0,03 мм; $B_n=64,8$ мм; $h_n=102$ мм; $J_p=5,37 \cdot 10^{-8}$ м⁴; $G=4 \cdot 10^{-10}$ Па; $[\Delta x]=0,1$ мм; $[\delta]=0,1$ мм; $[\Delta \gamma]=0,001^\circ$; $t_n + t_3 = 1$ мин; $N_{\text{станков}}=1$; $[t]^- = 100$ мин, $[T_{zp}] = 400^\circ$ С.

Зависимость для расчета силы резания [1] с учетом параметров режимов резания принятых в [9] была представлена в виде:

$$P_y = 23,1 \cdot S^{0,75} \cdot n^{-0,62}. \quad (7)$$

Конкретизированные расчетные зависимости сведены в таблицу. На рис. 4 показан вариант блокирующего контура для операции чистовой обработки моноколеса ГТД.

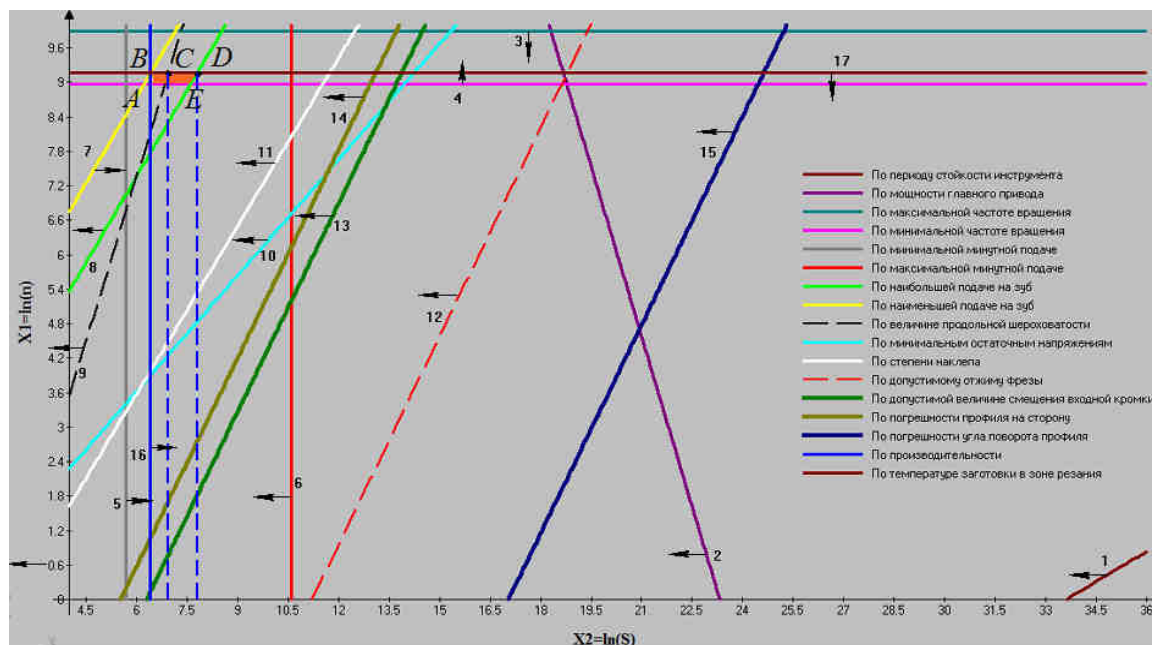


Рис. 4. Вариант блокирующего контура для выполнения операции чистовой обработки моноколеса ГТД

Таблица 1

Конкретизированные логико-математические зависимости, отражающие условия осуществимости операций. Ссылки на литературные источники или на расчетные зависимости этой статьи

№ п/п	Наименование	Конкретизированные зависимости	Источник
1	По периоду стойкости инструмента	$-0,74 \cdot X_1 + 0,26 \cdot X_2 \leq 8,74$	[9]
2	По мощности главного привода станка	$0,38 \cdot X_1 + 0,75 \cdot X_2 \leq 17,9$	[9]
3	По наибольшей частоте вращения шпинделя	$X_1 \leq 9,9$	Паспорт станка
4	По наименьшей частоте вращения шпинделя	$X_1 \geq 8,99$	Паспорт станка
5	По наибольшей подаче	$X_2 \leq 40000$	Паспорт станка
6	По наименьшей подаче	$X_2 \geq 300$	Паспорт станка
7	По наибольшей подаче на зуб	$-X_1 + X_2 \leq -1,36$	[9]
8	По наименьшей подаче на зуб	$-X_1 + X_2 \geq -2,27$	[9]
9	По величине продольной шероховатости	$0,44 \cdot X_1 - 0,84 \cdot X_2 \leq -1,82$	[9]
10	По статочные напряжения	$-23,88 \cdot X_1 + 19,43 \cdot X_2 \leq 12,13$	[9]
11	По степени наклепа	$-3,61 \cdot X_1 + 3,52 \cdot X_2 \leq 8,21$	[9]
12	По максимально допустимому отжиму фрезы	$-0,62 \cdot X_1 + 0,75 \cdot X_2 \leq 8,43$	[9]
13	По допустимому смещению входной кромки по оси X	$0,75 \cdot X_2 - 0,62 \cdot X_1 \leq 4,525$	(3)
14	По допустимому отклонению профиля на сторону	$0,75 \cdot X_2 - 0,62 \cdot X_1 \leq 3,946$	(4)
15	По допустимому отклонению угла разворота профиля	$0,75 \cdot X_2 - 0,62 \cdot X_1 \leq 10,652$	(5)
16	По производительности	$X_2 \geq 6,41$	(6)
17	По температуре в зоне резания	$X_1 \leq 9,17$	(7)

Показанные рис. 3 варианты БК для проведения чистовой операции высокоскоростного фрезерования поверхностей лопаток осевого титанового моноколеса с учетом дополнительных ограничений (см. табл., № 13-17). По оси абсцисс отложены значения скорости подачи, а по оси ординат – частота вращения шпинделя станка. Построения выполнены в логарифмических координатах.

Результаты анализа рис. 3 свидетельствуют о том, что в случае отсутствия финишной операции по уменьшению шероховатости поверхности, оптимальной с точки зрения производительности обработки будет точка С, что соответствует минутной подаче $S=1211$ мм/мин и частоте вращения шпинделя $n = 9617$ об/мин. В случае применения финишной операции электрохимической обработки по уменьшению параметра шероховатости [7] оптимальной точкой в пределах контура ABDE (см. рис. 4) будет точка D, что соответствует подаче $S=5426$ мм. При этом производительность обработки может быть повышена в 4,48 раза.

Ограничения по точности базовых поверхностей, в рамках принятых ограничений не оказали существенного влияния на оптимальные значения режимов резания.

Процедура поиска оптимума с применением БК упрощена тем, что требуется найти максимальное значение ординаты внутри БК.

Выводы

Применение дискретно-континуальных 3D-моделей кластеров блокирующих контуров при проектировании процессов механической обработки лопаток турбинных и компрессорных моноколес ГТД является эффективным методологическим приемом, позволяющим упростить процедуру комплексной оптимизации технологических процессов.

Для построения блокирующих контуров можно использовать типовые зависимости, отражающие связи между параметрами технологических операций, приведенные в справочной литературе.

Оптимизация структуры технологического процесса предельно эффективных маршрутов, режимов резания и допусков на базовые поверхности заготовок с применением рассмотренных моделей позволяет в 4,48 и более раз изменить значение критерия оптимальности. При этом в связи с большими диапазонами варьирования параметров целесообразно применять логарифмическую шкалу.

В дальнейших исследованиях формализовать процедуру поиска оптимума режимов резания на операциях механической обработки моноколес ГТД для условий применения различных конструкционных материалов.

Список литературы

1. Справочник технолога машиностроителя [Текст] / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. В 2 т. – М.: Машиностроение, 2003. Т.2. – 944 с.

2. Сорокин, В. Ф. Направленный синтез гибких технологических систем высокой и сверхвысокой производительности [Текст] / В. Ф. Сорокин, Н. Э. Тернюк // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Спец. выпуск «Новые технологии в машиностроении»: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – № 3(54). – Х., 2008. – С. 110 – 115.

3. Збірник задач і вправ з технології машинобудування [Текст]: навч. посібник / під ред. В. І. Аверчикова та П. П. Мельничука. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 314 с.
4. Сорокин, В. Ф. Повышение производительности и качества формообразования лопаточных моноколес при фрезеровании на станках с ЧПУ [Текст] / В. Ф. Сорокин, В. Ф. Мозговой // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 21. – Х., 2003. – С. 27 – 34.
5. Клец, Д. М. Концепция обеспечения стабильности показателей устойчивости и управляемости автомобилей: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.20 / Клец Дмитрий Михайлович. – Х., 2015. – 538 с.
6. Обработка проточных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием / П. Д. Жеманюк, А. В. Богуслаев, С. В. Мозговой и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 7(15). – С. 215 – 219.
7. Павлинич, С. П. Перспективы применения импульсной электрохимической обработки в производстве деталей газотурбинных двигателей [Текст] / С. П. Павлинич // Вестник УГАТУ. – 2008. – Т.11, № 2(29). – С. 105 – 115.
8. Уровни концентрации технологического воздействия при обработке моноколес компрессоров и турбин газотурбинных двигателей [Текст] / В. Ф. Сорокин, И. А. Тернюк, А. В. Беловол, Е. В. Шандыба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – № 4(76). – Х., 2013 – С. 73 – 79.
9. Повышение эффективности процесса ВСФ центробежных колес за счет оптимизации режимов резания и использования высокопроизводительных методов обработки [Текст] / Э. В. Кондратюк, Г.В. Пухальская, В.Г. Жарик и др. // Вестник двигателестроения. – 2012. – №1. – С.103 –114.
10. Тернюк, Н. Э. Структуры систем контроля точности в вариативных технологических системах [Текст] / Н. Э. Тернюк, В. Ф. Сорокин, О. В. Демченко // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. Технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – № 4. – С. 13 – 20.
11. Сорокин, В. Ф. Научные основы проектирования высокопроизводительных гибких технологических систем для производства фасонных деталей энергетических машин: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08 / Сорокин Владимир Федорович. – Х., 2009. – 450 с.
12. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач [Текст] / под ред. И. А. Болотовского. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
13. Тернюк, Н.Э. Основы комплексной оптимизации технологических систем для производства зубчатых колес: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08 / Тернюк Николай Эммануилович. – Х., 1983. – 433 с.
14. Тернюк, И. А. Постановка задачи и алгоритм комплексной оптимизации схемы срезания припуска при механической обработке поверхностей моноколес газотурбинных двигателей [Текст] / И. А. Тернюк, В. Ф. Сорокин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. Аэрокосмического ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Вып. 66. Х., 2014. – С. 53 – 63.
15. Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов [Текст] / В.Н. Трусов, Д. Л. Скуратов, О. И. Законов, В. В. Шикин // Вестн. Самарск. гос. Аэрокосм. Ун-та. – 2011. – №3 (27). – С. 57 – 62.

Поступила в редакцию 14.04.16

Застосування дискретно-континуальних 3D-моделей кластерів блокуючих контурів при проектуванні технологічних маршрутів обробки лопаток моноколів компресорів і турбін ГТД

Розглянуто питання застосування дискретно-континуальних 3D-моделей кластерів блокуючих контурів для комплексної структурно-параметричної оптимізації технологічних маршрутів механічного оброблення лопаток моноколів компресорів і турбін газотурбінних двигунів. Вдосконалено логіко-математичні моделі для плоских блокуючих контурів і застосовано для локальної параметричної оптимізації окремих технологічних операцій, шляхом введення обмежень на параметри режимів різання для виконання умов забезпечення нормованих показників якості в межах установлених допусків і заданої продуктивності оброблення. Показано можливість вибору гранично ефективних маршрутів, режимів різання і допусків на базові поверхні заготовок при застосуванні вказаних вище моделей.

Ключові слова: дискретно-континуальні 3D-моделі, кластери блокуючих контурів, процеси механічного оброблення, технологічний маршрут, моноколеса ГТД, оптимізація.

Utilizing the discrete and continual 3-D models of the limiting contours clusters during developing manufacturing routes for machining gas turbine engine compressors and turbine blisks blades

The problems of utilizing of the discrete and continual 3D – models of the limiting contours clusters in order to implement the complex structural and parametrical optimization of the manufacturing routes for machining gas turbine engine compressors and turbine blisks blades are considered. The logical and mathematical models for plane limiting contours, which are used for the local parametrical optimization of the particular manufacturing operation by means of putting the additional cutting modes parameters limits in order to fulfill conditions of normed precision factor being in the range of the specific tolerances and the manufacturing productivity, are improved. The method of determination of the maximal effective manufacturing by criteria of maximal productivity, cutting modes and base workpiece surfaces tolerances is represented.

Ключові слова: discrete and continual 3D – models, limiting contours clusters, manufacturing process, manufacturing route, GTE blisk, optimization.

Сведения об авторах:

Тернюк Игорь Александрович – аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

Сорокин Владимир Федорович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологий производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».