

УДК 621.01

А. Н. Михайлов¹, д-р техн. наук, проф., **А. В. Анастасьев**¹, аспирант,
Н. С. Пичко², д-р филол. наук, проф.

¹ Донецкий национальный технический университет,

² Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинск

Тел. / Факс: +79493497428; E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД

В данной статье, на основе анализа конструктивных особенностей и механизмов разрушения лопаток турбин ГТД определены ключевые факторы, которые применены в качестве граничных условий в разработанной методике синтеза технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины и выбора рациональных вариантов. Выбранные граничные условия, характеризующие процесс синтеза технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки, разделены в группы, характеризующие: деталь (заготовку) и её физико-механические свойства; режимы обработки, такие как скорость резания или усилие прижима; инструмент. Составлена матрица множества факторов, влияющих на процесс синтеза технологического обеспечения, и граф множества. Применение к последнему алгоритма Дейкстры позволит определить рациональный метод синтеза.

Ключевые слова: лопатка, турбина, ГТД, синтез, воздействия, процесс

A. N. Mikhaylov, A. V. Anastasyev, N. S. Pichko

METHOD OF SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL SUPPORT OF INCREASING THE RESOURCE OF FINISHING AND HARDENING TREATMENT OF GTE TURBINE BLADES

In this article, on the basis of an analysis of the design features and mechanisms of destruction of turbine blades of gas turbine engines, key factors are determined that are used as boundary conditions in the developed methodology for the synthesis of technological support for finishing and hardening treatment of turbine blades in order to increase their service life. The selected boundary conditions that characterize the process of synthesis of technological support for finishing and hardening treatment are divided into groups characterizing: a part (workpiece) and its physical and mechanical properties; machining conditions such as cutting speed or clamping force; tool. A matrix of many factors influencing the process of synthesis of technological support, and a graph of the set are compiled. Applying Dijkstra's algorithm to the latter will allow us to determine a rational synthesis method.

Keywords: blade, turbine, gas turbine engine, synthesis, impact, process

1. Введение

Современный уровень производственных процессов требует всё более высокого выхода конечных продуктов. Конструкционные материалы, применяемые при экстремальных условиях эксплуатации должны быть работоспособными и надежными.

При обработке лопаток турбин (ЛТ) наиболее широко используются методы механической обработки и основанные на них комбинированные методы обработки. Благодаря современным высокоточным методам получения заготовок, например для лопаток статора турбины, заготовки изготавливают литые без припуска по перу, что сводит механическую обработку к обработке поверхностей хвостовиков [1].

Операции отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), могут включать в себя: черновое и чистовое шлифование, полирование, глянецвание, ультразвуковое упрочнение шариками, дробеструйную обработку, нанесение покрытий различными методами, термическую обработку. Точный состав и количество операций определяется в зависи-

мости от типа и характеристик конкретной ЛТ, и выдвигаемых к ней эксплуатационных требований.

Целью данной работы является разработка методики синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбины ГТД на основе комплексных методов обработки, для повышения их ресурса за счет решения вопросов функциональной ориентации технологических воздействий.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: анализ конструктивных особенностей и механизмов разрушения лопаток турбин; определение ключевых факторов, которые можно использовать в качестве граничных условий при проведении синтеза технологического обеспечения; разработка методики синтеза технологического обеспечения ОУО ЛТ ГТД и выбора рациональных вариантов из генерируемого множества.

2. Основное содержание и результаты работы

Лопатки турбины ГТД работают при повышенных температурах в агрессивной среде, и подвергаются большим центробежным нагрузкам. Профильная часть и хвостовики лопаток кроме растяжения и изгиба от центробежных сил испытывают переменные напряжения от вибрационных и тепловых нагрузок [2]. Это характеризует их сложную пространственную геометрию, позволяющую им выполнять свою непосредственную функцию в условиях высоких температур, давления, воздействия механических и химических составляющих газового потока.

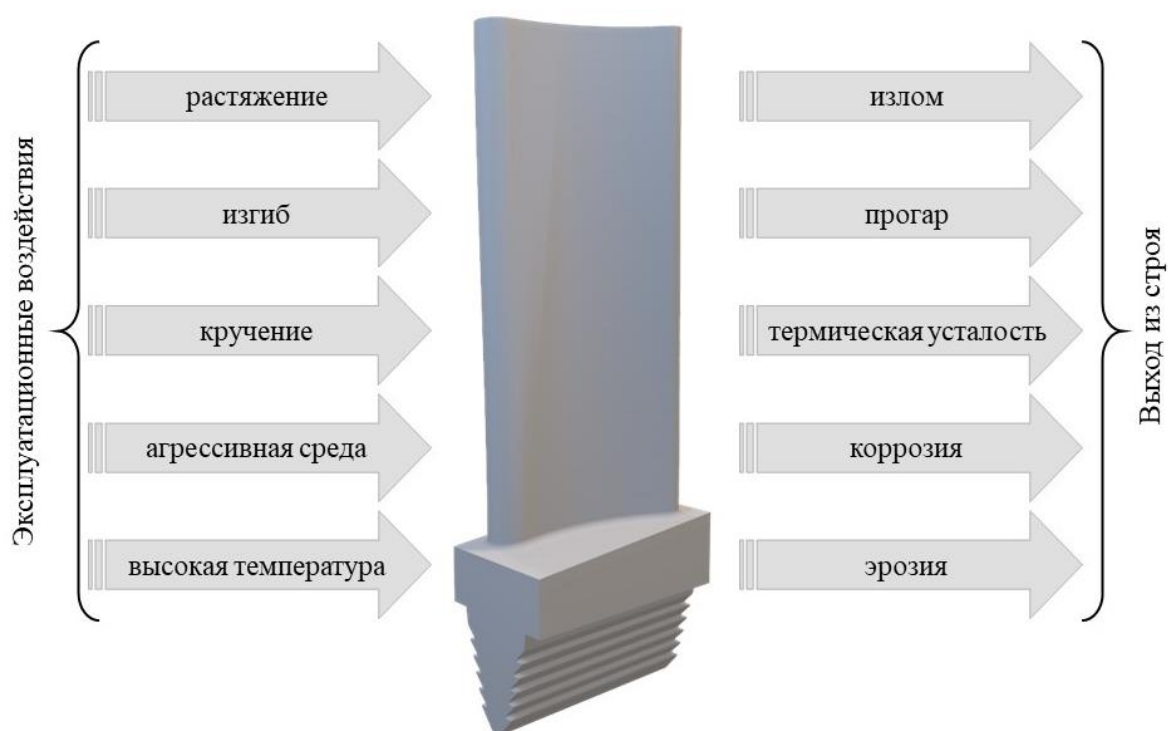


Рисунок 1. Основные эксплуатационные воздействия, приводящие к выводу из строя лопаток турбины ГТД

Лопатки турбин подвергаются следующим основным действующим эксплуатационным функциям, приводящим к разрушению – действию высокой температуры газового потока, статических и циклических нагрузок (рис. 1), а также действию процес-

сов газовой коррозии. Эти воздействия, по механизму их действия, можно структурировать в три основные группы: механические, химические и температурные [3]. Механические воздействия включают в себя напряжения растяжения и изгиба от центробежных сил, изгиб и кручение от газового потока, а также переменные напряжения от вибрационных нагрузок [4]. В зависимости от конструкции лопатки, в частности от расположения центра тяжести, центробежные силы, возникающие в работе ГТД могут вызывать как напряжения растяжения в поперечных сечениях лопатки, так и напряжения растяжения и изгиба [5]. Эксплуатационные воздействия химического характера включают в себя эрозию, коррозию, окисление, нагар. Температурные воздействия наиболее ярко характеризуются двумя видами повреждений: перегреву выше температуры старения, что приводит к изменению микроструктуры металла, а следовательно, к снижению характеристик прочности, а также к термической усталости, проявляющейся в появлении термонапряжений, вызванных многократным неравномерным изменением температуры между входной и выходной кромками лопатки и основным телом. Следует отметить неравномерное распределение температуры в теле лопатки [6] и соответствующие возникающие напряжения под действием эксплуатационных нагрузок.

Как следствие, под действием неравномерных эксплуатационных воздействий ЛТ ГТД подвергаются неравномерному износу, что в дальнейшем приводит к их досрочному выходу из строя. Проблеме неравномерности износа посвящен ряд работ [7, 8], в которых авторы предлагают повышать не ресурс всего изделия в целом, а основываясь на особенностях эксплуатации применять функционально-ориентированный подход, для повышения ресурса за счет адаптации их свойств к особенностям действия неравномерного износа рабочих поверхностей [8].

Лопатки турбин ГТД имеют широкую номенклатуру применяемых материалов, конструктивных исполнений и особенностей, как в пределах различных ступеней турбины одного двигателя, так и в целом, с учетом широкого спектра существующих ГТД. При этом, на процесс синтеза требуемого технологического обеспечения будут влиять такие факторы как: характеристики заготовки и детали, режимы резания, параметры режущего инструмента.

Учитывая приведенные факторы обобщенно и в частности, можно провести синтез множества вариантов технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины. При этом полученный результат будет зависеть от выбранных граничных условий.

Для решения данной задачи применим метод морфологического анализа [9, 10], позволяющий охватить все возможные варианты технических решений.

Для этого необходимо учесть все возможные факторы, влияющие на результаты процесса ОУО.

Проведенный анализ конструктивных особенностей и эксплуатационных функций позволяет выделить следующие граничные условия, характеризующие деталь и заготовку:

- варианты материала лопатки;
- варианты защитных покрытий;
- варианты возможного исходного состояния лопатки;
- варианты возможных параметров неравномерности эксплуатационных воздействий;

- варианты групп шероховатости поверхности после ОУО.

Группа граничных условий, характеризующих режимы резания включает в себя:

- возможные варианты скорости резания;

- варианты возможной величины снимаемого припуска;
- варианты величины прижима при полировании.

Характеристики инструмента и применяемых полировальных паст образуют третью группу граничных условий, включающих:

- варианты используемых полировальных материалов;
- варианты технологических средств для реализации процессов полирования;
- варианты параметров соотношения элементов технологических средств полирования.

Тогда процесс синтеза технологического обеспечения с целью повышения ресурса лопаток турбины ГТД можно выразить в виде множества факторов, при этом каждый элемент множества состоит из подмножеств:

$$M = \{A, B, C, D, E, F, G, H, K, U, V\}, \quad (1)$$

где A – факторы, учитывающие варианты материала лопатки;
 B – факторы, учитывающие варианты защитных покрытий;
 C – факторы, учитывающие состояние заготовки до процесса обработки;
 D – факторы, учитывающие варианты возможных параметров неравномерности эксплуатационных воздействий;
 E – факторы, учитывающие варианты групп шероховатости поверхности после ОУО;
 F – факторы, учитывающие возможные варианты скорости резания;
 G – факторы, учитывающие варианты возможной величины снимаемого припуска;
 H – факторы, учитывающие варианты величины прижима при полировании;
 K – факторы, учитывающие варианты используемых полировальных материалов;
 U – факторы, учитывающие варианты технологических средств для реализации процессов полирования;
 V – факторы, учитывающие варианты параметров соотношения элементов технологических средств полирования.

При этом каждый элемент множества (1) состоит из подмножества элементов, так, подмножество факторов, учитывающих варианты материала лопатки имеет вид:

$$A = \{A_1, A_2 \dots A_{i-1}, A_i\}, \quad (2)$$

где A_1, A_2, A_i – возможные варианты используемых материалов ЛТ ГТД.

Аналогичными подмножествами можно представить все факторы, учитываемые в множестве (1). Таким образом, получим множество подмножеств фактором, учитывающих варианты нанесенных защитных покрытий, состояние заготовки до процесса обработки, параметры неравномерности эксплуатационных воздействий, группы шероховатости поверхности, варианты возможной скорости резания и величины снимаемого припуска, используемых материалов и технологических средств для реализации процессов полирования.

Рассмотренные подмножества, влияющие на процесс синтеза технологического обеспечения, представим в виде морфологической матрицы:

$$M = \begin{pmatrix} A_1, A_2 \dots A_{i-1}, A_i \\ B_1, B_2 \dots B_{j-1}, B_j \\ C_1, C_2 \dots C_{n-1}, C_n \\ D_1, D_2 \dots D_{m-1}, D_m \\ E_1, E_2 \dots E_{l-1}, E_l \\ F_1, F_2 \dots F_{o-1}, F_o \\ G_1, G_2 \dots G_{p-1}, G_p \\ H_1, H_2 \dots H_{q-1}, H_q \\ K_1, K_2 \dots K_{r-1}, K_r \\ U_1, U_2 \dots U_{s-1}, U_s \\ V_1, V_2 \dots V_{w-1}, V_w \end{pmatrix} \quad (3)$$

Графически это множество факторов можно выразить с помощью теории графов [11]. Полученный граф приведен на рис. 2.

Для матрицы (3) полное число генерируемых вариантов технологического оснащения (ТО) ОУО N можно определить как произведение вариантов каждой строки факторов

$$N = i \cdot j \cdot n \cdot m \cdot l \cdot o \cdot p \cdot q \cdot r \cdot s \cdot w. \quad (4)$$

Следующим шагом является уточнение количества вариантов в каждом факторе, от чего будет зависеть количество генерируемых вариантов ТО ОУО.

В настоящее время при производстве ЛТ ГТД применяется множество различных материалов, поэтому выбор будет напрямую зависеть от рассматриваемого двигателя. Так, для двигателя ТВЗ-117 и его производной ВК-2500 характерны лопатки из следующих материалов: титан ВТ12, титан ВТ14, титан ВТ22 и титановый сплав ВТ8М-1.

Факторы, учитывающие варианты защитных покрытий, укрупненно можно разделить на следующие группы: с нанесенными одно или многослойными в т.ч. градиентными жаростойкими покрытиями; с защитными износостойкими покрытиями и без защитных покрытий.

Факторы, учитывающие состояние заготовки до процесса обработки можно разделить на 2 группы, характеризующие исходную заготовку как новую (с равномерным распределением припуска), или восстанавливаемую, характеризующуюся неравномерным распределением припуска.

В зависимости от конструкции, ступени и т.д. ЛТ ГТД подвергаются различным эксплуатационным воздействиям, так, лопатки первой ступени подвергаются значительным температурным воздействиям, с перепадами температур по профилю пера лопатки 200°C и выше, и существенному абразивному воздействию по входной кромке [3], факторы неравномерности воздействия разделяем на 3 вида: с минимальной, умеренной и высокой неравномерностью эксплуатационных воздействий.

Факторы, учитывающие варианты групп шероховатости поверхности после ОУО включают в себя значения шероховатости $Ra - 0,32, 0,63, 1,25$ [12].

Так, возможные варианты скорости резания при полировании будут равны: 10 м/с; 30 м/с и 50 м/с.

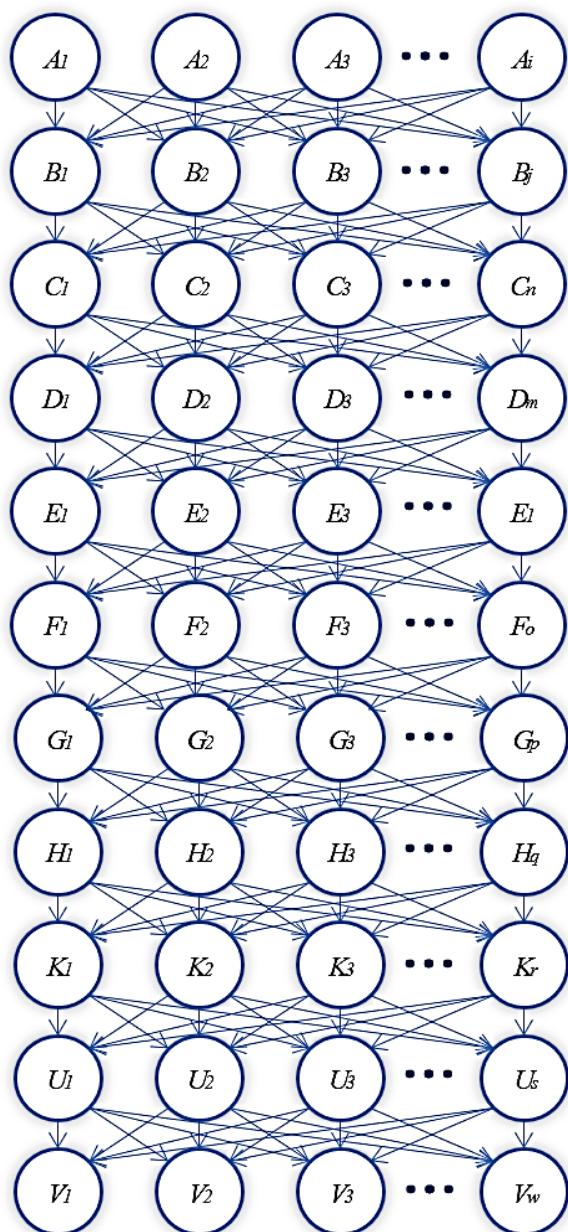


Рисунок 2. Граф процесса синтеза технологического обеспечения

Для дальнейшего анализа такое огромное количество вариантов является избыточным, и выбрать искомый вариант затруднительно. С учетом того, что процесс синтеза технологического оснащения ОУО производится под конкретные варианты ЛТ ГТД, значения группы факторов, характеризующих деталь и заготовку будут известны, тем самым количество факторов *A, B, C, D, E* будет равно 1, а количество возможных вариантов технологических средств для полирования уменьшится с 9 до 6. Подставив полученные значения факторов в уравнение (4), получим:

$$N = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 3 = 1458 \text{ (вариантов)}$$

Величина снимаемого припуска при изготовлении новых лопаток может составлять до 0,07 мм, в то время как при восстановлении может достигать до 0,3 мм. Для уменьшения количества генерируемых вариантов ограничиваемся тремя значениями данного фактора – до 0,07 мм, до 0,2 мм и свыше.

Величина прижима при полировании может варьироваться в диапазоне до 100 Н, что будет целесообразно разделить на 3 возможных варианта – 10 Н, 50 Н и 100Н.

Существующие материалы, используемые при полировании, можно разделить на 3 группы:

1. Фетровые и войлочные круги;
2. Круги из различных тканей и прессованной бумаги;
3. Круги из резины или других эластичных материалов.

При полировании используется широкий спектр технологических средств полирования, включающих естественные (крокус, мел, венская известь, тальк, диатомит, трепел) и искусственные (окиси железа FeO, хрома CrO, алюминия Al₂O₃).

Наиболее распространенными соотношениями элементов технологических средств полирования являются следующие: 1:1, 1:3 и 1:5 [13].

Подставив выбранные значения факторов в уравнение (4), получим:

$$N = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 3 = 472392 \text{ (вариантов)}$$

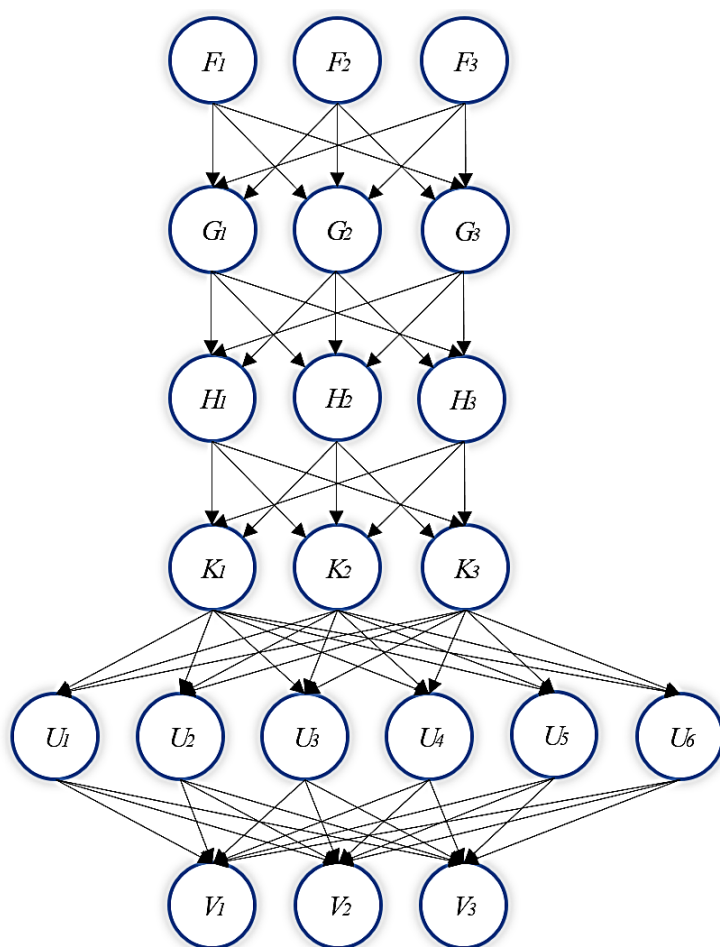


Рисунок 3. Уточненный граф процесса синтеза технологического обеспечения

Так, назначаем вес элементов следующим образом. Влияние факторов, учитывающих скорость резания, распределяем следующим образом – максимальный вес 100 принимаем при минимальной скорости резания 10 м/с, значение веса 50 – при скорости резания 30 м/с, и 10 при максимальной – 50 м/с.

Аналогично, задаем вес факторов, учитывающих величину снимаемого припуска – от 20 для минимального припуска до 100 для максимального.

Влияние полировального материала, исходя из его свойств, учитываем соответствующим распределением веса: 30 для кругов из резины или других эластичных материалов; 80 для войлочных и фетровых кругов; 100 для тканевых кругов, и кругов из прессованной бумаги.

При полировании металлов и сплавов искусственные технологические средства показывают себя более эффективно, чем естественные. Соответственно вес этих элементов будет распределен следующим образом: 20 для окиси алюминия Al_2O_3 , 40 для окиси хрома CrO , 60 для окиси железа FeO ; 80 для трепела и диатомита и 100 для таких естественных материалов как крокус, мел, венская известь и тальк.

С учетом выбранных граничных условий, граф процесса синтеза (рис. 1) примет вид, представленный на рис. 2.

Применив к разработанному графу алгоритм Дейкстры [14], определим рациональный метод синтеза технологического обеспечения для ОУО. Алгоритм Дейкстры позволяет находить кратчайшие пути от одной из вершин взвешенного ориентированного графа ко всем остальным его вершинам, при условии отсутствия дуг отрицательного веса.

Приняв за основу граф процесса синтеза технологического обеспечения (рис. 3), состоящий из 6 рядов элементов включающих в себя n -элементов в ряду, которые соединены направленными дугами, задаемся их весом, характеризующим влияние конкретного элемента в ряду на формирование требуемых функциональных свойств в каждом функциональном элементе изделия.

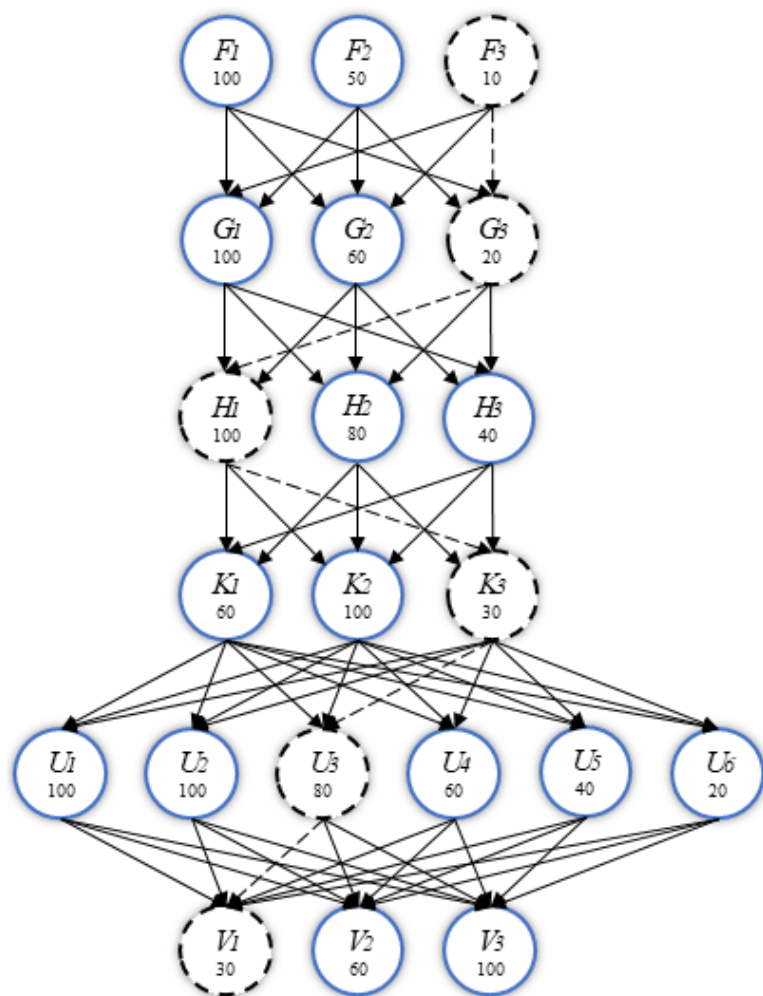


Рисунок 4. Граф процесса синтеза технологического обеспечения учитывающий удельный вес элементов: — генерируемое множество возможных вариантов ТО; — — рациональный вариант из рассмотренных вариантов при заданных исходных данных.

ковой требуемой исходно шероховатости и равном припуске на обработку.

Первый из рассматриваемых вариантов, характеризуется максимальной скоростью резания с минимальным усилием прижима, и будет иметь следующий вид:

$$F_1 \rightarrow G_3 \rightarrow H_3 \rightarrow K_2 \rightarrow U_3 \rightarrow V_2$$

Вес данного варианта будет равен:

$$\sum p = 100 + 20 + 40 + 100 + 80 + 60 = 400$$

Вес факторов, учитывающих варианты параметров соотношения элементов технологических средств полирования распределяем исходя из того, что с увеличением доли технологических средств увеличивается интенсивность полирования. Тогда вес этих факторов будет иметь следующий вес: 30, для соотношения 1:1; 60 – для 1:3 и 100 для 1:5.

Задавшись весом всех элементов всех рядов общий вид графа синтеза (рис. 3) для применения алгоритма Дейкстры, будет иметь вид (рис. 4).

Задачей использования этого алгоритма станет определение пути с минимальным весом дуги, за счет пошагового перебора всех вершин графа.

Рассмотрим 3 варианта синтеза ТО ОУО из возможного множества, и сравним их вес, для определения рационального. Данные варианты охватывают различные материалы полировального инструмента, технологических средств, используемых при полировании и режимов резания при одинаковой

Второй рассматриваемый вариант характеризуется величиной скорости резания 30 м/с и усилием прижима 50 Н будет иметь следующий вид:

$$F_2 \rightarrow G_3 \rightarrow H_2 \rightarrow K_1 \rightarrow U_3 \rightarrow V_3$$

Вес данного варианта будет равен:

$$\sum p = 50 + 20 + 80 + 60 + 80 + 100 = 390$$

Третий рассматриваемый вариант, характеризующийся минимальной скоростью резания и максимальным усилием прижима имеет вид:

$$F_3 \rightarrow G_3 \rightarrow H_1 \rightarrow K_3 \rightarrow U_3 \rightarrow V_1$$

Вес данного варианта будет равен:

$$\sum p = 10 + 20 + 100 + 30 + 80 + 30 = 270$$

Так, из трех рассмотренных вариантов, третий вариант обладает наименьшим весом, следовательно, является наиболее рациональным при заданных исходных данных.

3. Заключение

Таким образом, на основании анализа конструктивных особенностей и механизмов разрушения ЛТ ГТД определены ключевые факторы, используемые в качестве граничных условий в предложенной методике синтеза технологического обеспечения ОУО. Выбранные граничные условия, характеризующие процесс синтеза технологического обеспечения ОУО, разделены в группы:

- характеризующие деталь и заготовку;
- характеризующих режимы резания;
- характеризующие применяемый инструмент и оснастку.

Основываясь на выбранных граничных условиях составлена матрица и граф множества. Применяв к последнему алгоритм Дейкстры, можно определить рациональный метод синтеза технологического обеспечения среди сгенерированного множества существующих вариантов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Абраимов, Н. В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов: Учеб. Пособие для авиационных вузов / Н. В. Абраимов, Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов. – Москва: Высшая школа, 1998. – 444 с., ил.

2. Тихонов, А. С. Внедрение технологий «Цифрового двойника» применительно к оптимизации теплового состояния и повышению ресурса охлаждаемых лопаток промышленных газовых турбин / А. С. Тихонов, А. Ю. Тамм, А. В. Пивоварска // Сборник докладов LXV научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Фундаментальные проблемы исследований, разработок и реализации

научных достижений в области газовых турбин в российской экономике». – Санкт-Петербург: ОАО «ВТИ», – 2018. – С. 44-50.

3. Михайлов, А. Н. Основы синтеза механизма повышения ресурса лопаток турбины газотурбинного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / А. Н. Михайлов, А. В. Анастасьев, Н. С. Пичко // Международный сборник научных трудов: Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2022. – № 4(79). – С. 35-43. – EDN LGNZXZ.

4. Налимов, Ю. С. Анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей / Ю. С. Налимов // Металл и литье Украины. – 2014. – № 12. – С. 17-22

5. Сутягин, А. Н. Современные проблемы технологии производства авиационных двигателей: Конспект лекций / А. Н. Сутягин. – Рыбинск: РГАТУ, – 2016. – 142 с.

6. Анализ условий работы поверхностных слоев рабочих лопаток турбины современных двигателей / М. А. Петрова, Мехди Саадатибаи, А. И. Тарасов / Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №217 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-usloviy-raboty-poverhnostnyh-sloev-rabochih-lopatok-turbiny-sovremennyh-dvigatelay> (дата обращения: 24.09.2022).

7. Хавлин, Т. В. Разработка метода повышения ресурса лопаток турбины вертолетного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 4-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 22–25 мая 2018 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, – 2018. – С. 136-139.

8. Михайлов, А. Н. Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационного двигателя на базе функционально-ориентированной технологии / А. Н. Михайлов, Т. В. Хавлин // Международный сборник научных трудов: Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 1(56). – С. 84-100.

9. Одрин, В. М. Морфологический анализ систем. Построение морфологических таблиц / В. М. Одрин, С. С. Картавов – Москва: «Наукова думка», – 1977. – 148 с.

10. Настасенко, В. А. Морфологический анализ – метод синтеза тысяч изобретений. Изд 2-е, перераб. и доп. / В. А. Настасенко – Херсон: Изд-во Айлант, – 2015. – 100 с.

11. Оре, О. Теория графов / О. Оре. – Москва: Наука, 1980. – 336 с.

12. Абраимов, Н. В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов: Учеб. Пособие для авиационных вузов / Н. В. Абраимов, Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов. – Москва: Высшая школа, 1998. – 444 с., ил.

13. Киселев, С. П. Полирование металлов / С. П. Киселев – Москва: Машгиз, – 1961. – 74 с.

14. Gupta N. Applying Dijkstra's Algorithm in Routing Process / N. Gupta, K. Mangla, A. K. Jha, M. Umar Int. J // New Technol. Res, 2(5), 122-124 (2016).

Поступила в редколлегию 03.02.2023 г.