

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., **Д. В. Огренич**, аспирант
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, РФ
Тел.: +79494104485; E-mail: dmitryogrenich@yandex.ru

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

В статье представлены данные о неравномерном характере износа лопаток. Рассмотрены разные методы для наплавления, создан алгоритм, который учитывает величину износа и помогает выбрать метод реализации ремонта. Выполнен анализ влияющих факторов на выносливость рабочих поверхностей лопаток. Рассмотрены основные особенности отделочно-упрочняющей обработки.

Ключевые слова: лопатка, остаточные напряжения, выносливость, наплавление лопаток, ремонт и восстановление рабочих поверхностей лопаток.

A. N. Mikhaylov, D. V. Ogrenich

MAIN FEATURES OF THE SYNTHESIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS FOR REPAIR AND RESTORATION OF GTE COMPRESSOR BLADES

The article presents data on the uneven nature of blade wear. Various methods for surfacing are considered, an algorithm is created that takes into account the amount of wear and helps to choose a repair method. An analysis of the influencing factors on the endurance of the working surfaces of the blades was carried out. The main features of finishing and strengthening treatment are considered.

Key words: blade, residual stresses, endurance, fusion of blades, repair and restoration of blade working surfaces.

1. Введение

Ремонт и восстановления лопаток в последние годы является довольно перспективным направлением, в связи с тем, что в мировом масштабе идет тренд на экономное производство и как можно большем продлении ресурса работы, при этом, не теряя в эксплуатационных возможностях. Нужно отметить, что газотурбинный двигатель (ГТД) имеет большое количество лопаток, они довольно сложные и дорогие в изготовлении, т.к. имеют сложную геометрию и серьезные требования к структуре поверхностного слоя.

В технологическом процессе ремонта и восстановления поверхностей лопаток применяются комбинированные и комплексные методы, что позволяют в свою очередь получить необходимые свойства. Технологический процесс (ТП) ремонта и восстановления лопаток можно условно разделить на два этапа, на первом этапе лопатки подвергаются процессам восстановления геометрии и размеров с помощью методов наплавки и наварки, а на втором этапе с помощью различных методов отделочно-упрочняющих обработок (ОУО) получить необходимые свойства в поверхностном слое. Стоит заметить, что в последнее время для повышения эксплуатационных свойств, применяется функционально-ориентированные свойства (ФОС) их элементов [1].

Цель работы – определение основных особенностей синтеза технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД.

Для достижения данной цели необходимо решение следующих задач: принцип разделения лопаток на элементарные функциональные элементы, выполнить анализ особенностей действия неравномерного износа, выполнить анализ влияющих факторов на выносливость лопаток, рассмотреть возможности и методы наплавления, создать

алгоритм учитывающий разнообразие неравномерности износа при наплавлении, рассмотреть особенности процессов ОУО.

2. Основное содержание работы

Для удобства и лучшего описания процессов происходящих на поверхности лопаток, лопатки представляют, как систему, состоящую из разных элементарных функциональных элементов применяя при этом метод морфологического синтеза технических решений [2]. В данном случае мы разобьём сложнопрофильную форму пера лопатки на основные конструктивные элементы, что позволит нам лучше понимать и описывать функции, происходящие в процессе эксплуатации, что приводит к неравномерному износу, и тем самым назначать более уточнённые технологические воздействия в процессе ремонта.

Примеры функциональных элементов пера лопатки на рис. 1.

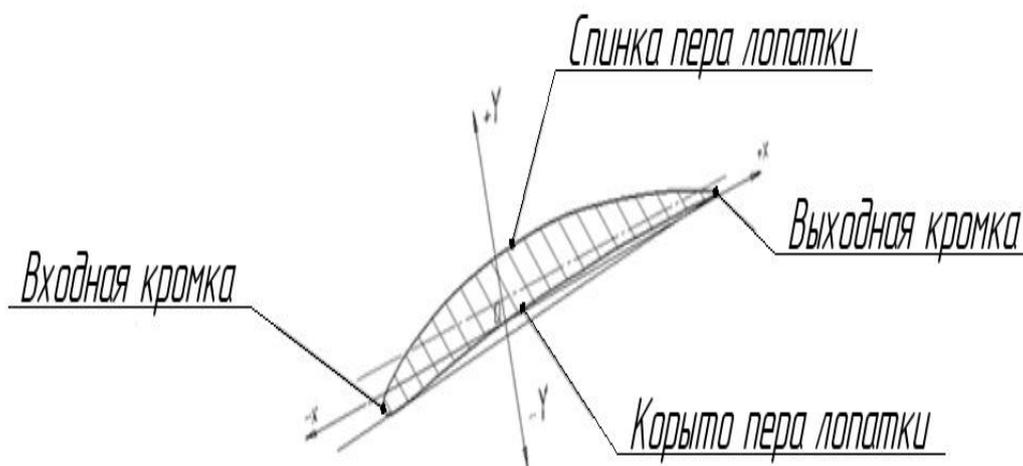


Рисунок 1. Основные элементы пера лопатки компрессора

Группы функциональных элементов можно представить в виде матриц [3].

Группа элементов спинки пера лопатки:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Группа элементов корыта пера лопатки:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & b_{m3} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Группа элементов входной кромки:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Группа элементов выходной кромки:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & d_{m3} & \cdots & d_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Общую структуру пера лопаток можно представить совокупностью четырех групп элементов: входной кромки, выходной кромки, спинки лопатки и корыта лопатки:

$$F = A \cup B \cup C \cup D \quad (5)$$

где F – общая структура пера лопатки; A – группа элементов спинки пера лопатки; B – группа элементов корыта пера лопатки; C – группа элементов входной кромки; D – группа элементов выходной кромки.

Лопатки ГТД имеют сложную форму и в процессе работы лопатки подвергаются различным видам воздействий, эти воздействия имеют неравномерный характер и тем самым приводят к неравномерному износу. Неравномерный износ по поверхности пера лопатки имеет довольно сложную структуру и сложную цепь взаимодействий, так авторы [4, 5] отмечают, что в процессе ремонта следует учитывать износы различных типов и по разным поверхностям. В процессе работы лопатки подвергаются износу под действием комплексных воздействий:

- воздействия инородных тел;
- температурные воздействия;
- абразивные воздействия;
- эрозионные воздействия;
- коррозионные воздействия.

В процессе эксплуатации кроме воздействий внешней среды на лопатки влияют силовые факторы определяемых самой конфигурацией лопаток и действием различных внешних сил показаны на рисунке 2.

На выносливость рабочих поверхностей лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях умеренно-повышенных температур и циклических нагрузок, влияет множество факторов, которые можно объединить в три основных группы: первая группа – конструктивные элементы, определяющие уровень концентрации напряжений сложнопрофильной формы лопаток, вторая – параметры микрогеометрии поверхности, третья – физико-механические свойства поверхностного слоя [6, 7].

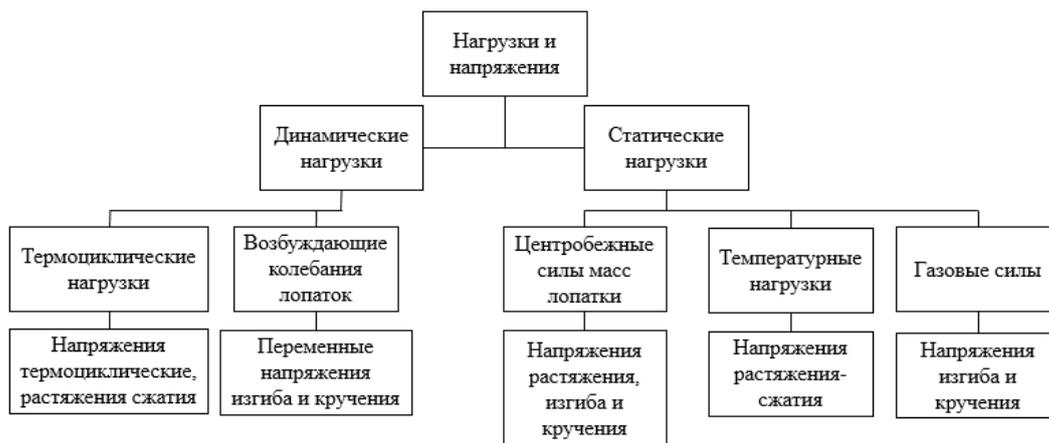


Рисунок 2. Нагрузки и напряжения, действующие на лопатки

Рассмотрим общий технологический процесс ремонта и восстановления рабочих профилей лопаток ГТД, который изображен на рис.3, в общем виде можно представить, как четыре основных этапа:

- обработка перед процессом наплавления;
- технологический процесс наплавления;
- обработка восстанавливаемой детали для получения необходимой геометрии и свойств в поверхностном слое;
- обработка восстанавливаемой детали для повышения эксплуатационных свойств.



Рисунок 3. Общий технологический процесс восстановления и ремонта рабочих профилей лопаток ГТД

Для начала производится осмотр поврежденных рабочих поверхностей лопаток. Определяется степень повреждаемости. Повреждаемость – это совокупность характеристик, которые описывают изменение весовых характеристик, геометрических и физико-механических свойств, как основного материала, так и покрытия. Другими словами, повреждаемость – это степень изменения работоспособности. Повреждаемость рабочих поверхностей лопаток существенно оказывает влияние на характеристики двигателя (устойчивость работы, расход топлива и безопасность полетов).

Изношенные лопатки поступают для процесса очищения и если необходимо, то выполняют также процессы обезжиривания и травления, далее их подвергают дефекации. Дефектами детали называют различные отклонения, которые образовались в процессе износа. В процессе дефекации детали подразделяют на разные уровни в зависимости от степени износа из-за тех или иных факторов. Далее происходит механическая обработка изношенных лопаток для удаления слоев, которые получили изменение структуры, эти слои удаляются, чтобы наплавленный слой сцеплялся с основным материалом, который не потерпел сильного изменения структуры, тем самым уровень адгезии между основным металлом и наплавленным будет выше.

Перед процессом наплавки необходимо решить множество сложных задач: выбор термического режима выполнения наплавки; выбор материала, который позволит обеспечить свойства в зависимости от эксплуатационных функций; возможность наплавки данного материала на основной металл; выбор режима и способа наплавки, определение необходимой термообработки.

Для того чтобы восстановить геометрию рабочих поверхностей лопаток применяются различные методы наплавки (наварки):

- электронно-лучевая;
- аргонодуговая (ТИГ);
- плазменная;
- лазерная.

В работе Фомичева Е.О. [8] предлагается технологический процесс восстановления моноколес компрессоров ГТД, включая методы восстановления лопаток методом аргонодуговой и электронно-лучевой наплавки, результаты показали, что наплавленный слой имеет приемлемую макро и микроструктуры, но с увеличением глубины наплавки предел прочности уменьшается, поэтому есть рекомендация использования ручной аргонодуговой сварки на глубину не более 5 мм. Долговечность образцов которые прошли восстановление ниже, чем образцов цельных, но несущественно.

Если же мы получили довольно сильно изношенную лопатку, то предлагается использовать специальную подготовленную поверхность идентичную разрушенной или же лопатку донора, данный способ позволяет восстановить форму и геометрию лопатки, не потеряв в физико-механических характеристиках. Похожий метод описан в патенте № 2218016 Великобритания, В23Р[9]. Для того чтобы соединить изношенную лопатку и подготовленную поверхность применяют специальные зубчики рисунок 4, в результате чего мы получаем меньший концентратор напряжений в сварочном соединении и возможность восстанавливать более изношенные лопатки и тем самым производить ремонт большого количества изношенных лопаток не теряя при этом в структуре восстановленного слоя.

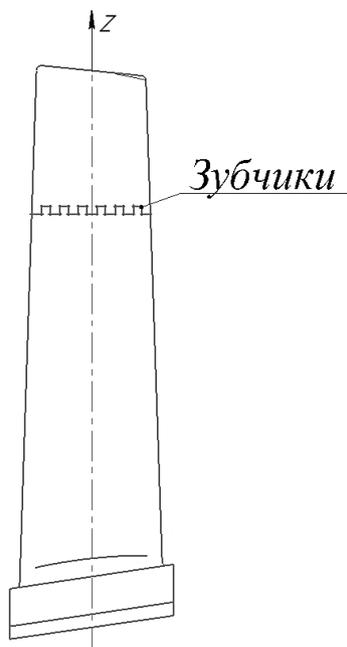


Рисунок 4. Применения зубчиков для ремонта лопаток ГТД

Следуя выше сказанному, сделаем алгоритм, изображенный на рисунке 5, для ручной аргодуговой наплавки с двумя вариантами, слоя наплавляются друг на друга, но будет ограничение в 5 мм, это ограничение обозначим $c=5\text{мм}$, следовательно $b \leq c$, где b – мм необходимые для наплавки, чтобы восстановить исходный контур лопатки.

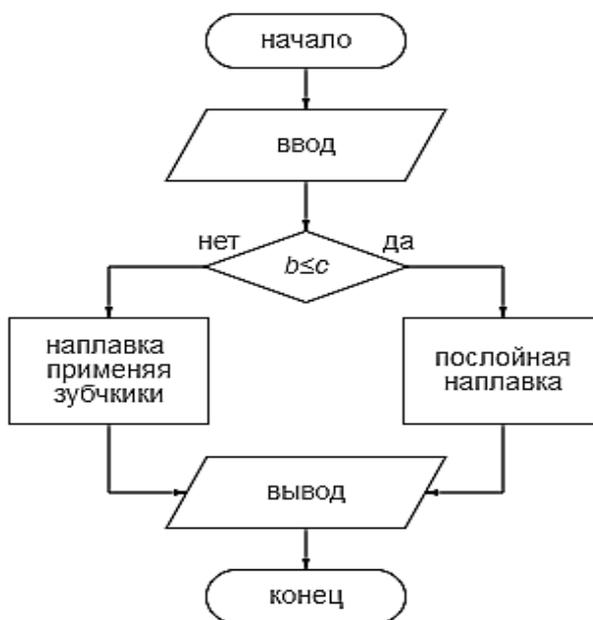


Рисунок 5. Алгоритм для ручной аргодуговой наплавки

Лопатки компрессора изготавливаются из двухфазного $(\alpha+\beta)$ титанового сплава (BT-8, BT8M-1). Получение требуемых механических свойств наплавленного

соединения достигается за счет выбора химического состава присадочной проволоки, система легирования должна быть близка к основному материалу. После наплавки, следует применять для снятия внутренних напряжений термообработку отжиг в вакууме.

После процесса наплавления, когда геометрические размеры рабочих поверхностей лопаток были восстановлены, но все еще остается лишний наплавленный слой, происходит механическая обработка для его снятия. Как правило, это происходит с помощью фрезерной операции. Далее нужно обеспечить в поверхностном слое необходимые физико-механические свойства, для этих целей используют различные операции ОУО. Разрушение лопаток имеет усталостный характер. Для увеличения выносливости лопаток компрессора необходимо увеличивать напряжения сжатия в поверхностном слое. Поэтому при оптимизации технологического процесса методами ОУО особое внимание обращают на:

- распределения общей глубины залегания сжимающих напряжений;
- распределение величины поверхностных сжимающих остаточных напряжений;
- распределение конструкционной и технологической концентрации напряжений;
- распределение степени наклепа поверхностного слоя.

Формирование напряженного состояния лопаток компрессора в процессе работы является суммированием рабочих нагрузок от постоянных растягивающих центробежных сил, циклических изгибающих моментов и внутренних остаточных напряжений [10].

Зависимость между пределом выносливости и соответствующими напряжениями [10, 11]:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1\text{исх}} - c \cdot \sigma_{\text{ост}} \quad (6)$$

где $\sigma_{-1\text{исх}}$ – предел выносливости полированных образцов; c – коэффициент, зависящий от пластических свойств материала и формы детали; $\sigma_{\text{ост}}$ – максимальные остаточные напряжения в поверхностном слое;

Следовательно, в процессе синтеза технологического процесса нужно особое внимание уделить особенностям конструкции, распределению сил в процессе работы и возможностью регулировать воздействия, реализованные в технологическом процессе ремонта и восстановления рабочих поверхностей, тем самым получая необходимые свойства восстановленной лопатки, с помощью чего реализуется подход функционально-ориентированных технологий (ФОТ).

Представим в математическом виде основные особенности рекомендаций по ОУО:

$$\begin{aligned} A: f(\sigma_{\text{ост}}) &\rightarrow \max \\ B: f(\sigma_{\text{ост}}) &\rightarrow \max \\ C: f(\sigma_{\text{ост}}) &\rightarrow \max \\ D: f(\sigma_{\text{ост}}) &\rightarrow \max \\ F: f(\sigma_{\text{ост}}) &\rightarrow \max \end{aligned} \quad (7)$$

где A – отображение структуры поверхности спинки пера лопатки; B – отображение структуры поверхности корыта пера лопатки; C – отображение структуры поверхности

входной кромки; D – отображение структуры поверхности выходной кромки; F – отображение общей структуры пера лопатки; $f(\sigma_{ост})$ – функция остаточных напряжений на поверхности, стремящиеся к максимальному значению;

Ограничение для реализации уровня остаточных напряжений задаётся в пределах от 0,5 до 1,1 от значений предела текучести материала, следовательно, зависимость 7 будет иметь вид:

$$\begin{aligned} A: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \\ B: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \\ C: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \\ D: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \\ F: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \end{aligned} \quad (8)$$

где A – отображение структуры поверхности спинки пера лопатки; B – отображение структуры поверхности корыта пера лопатки; C – отображение структуры поверхности входной кромки; D – отображение структуры поверхности выходной кромки; F – отображение общей структуры пера лопатки; $f(\sigma_{ост})$ – функция остаточных напряжений на поверхности стремящиеся к значению зависящему от предела текучести и коэффициента ограничения; k – коэффициент ограничения имеющий значение от 0,5 до 1,1; σ_T – предел текучести материала.

3. Заключение

Рассмотрели основные особенности синтеза технологического процесса ремонта и восстановления. Рассмотрен один из возможных принципов разделения лопаток на функциональные элементы. Выполнен анализ особенностей неравномерного износа. Выполнен анализ влияющих факторов на выносливость лопаток. Рассмотрены методы наплавления, и создан алгоритм учитывающий разнообразие неравномерности износа при наплавлении. Рассмотрели особенности распределения остаточных напряжений при процессах ОУО.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Настасенко В.А. Морфологический анализ - метод синтеза тысяч изобретений. - К.: Техніка, 1994. - 44 с.
3. Михайлов, А. Н. Синтез технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД / Михайлов А. Н., Огренич Д. В., Пичко Н. С., Недашковский А. П. // Машиностроение и техносфера XXI // Сборник трудов XXX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-17 сентября 2023 г. – Донецк: ДонНТУ, 2023. – С. 202-207. ISSN 2079-2670.
4. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированного подхода. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. - Донецк, 2016. - 22 с.
5. Михайлов, В. А. Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Михайлов, В. А. - Донецк, 2019. - 18 с.

6. Богуслаев А. В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Монография / А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин; Под ред. Д. В. Павленко, С. А. Субботина. – Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2009. – 468 с.

7. Петухов А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД /А. Н. Петухов. – М. : Машиностроение, 1993. – 332 с.

8. Фомичев, Е. О. Разработка способов восстановления моноколес газотурбинных двигателей. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / Фомичев, Е. О. – Москва, 2013. – 18 с.

9. Патент № 2218016, Великобритания, В23Р. Способ ремонта облопаченных дисков. Опубл. 17.11.89.

10. Сазонов М. Б., Соловацкая Л. В. Влияние напряжённого состояния поверхностного слоя на выносливость лопаток компрессора газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 109-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-109-117.

11. Биргер И. А. Остаточные напряжения. - М.: Машгиз, 1963. 232 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2024