

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

© 2007 Г. В. Смирнов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены вопросы проектирования технологии окончательной электрохимической обработки (ЭХО) пера лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) с учетом факторов технологической наследственности. Приведена классификация факторов технологической наследственности и их влияние на точность ЭХО и качество поверхности после обработки. Описаны принципы изменения схемы реализации ЭХО, приводится содержание основных задач, решаемых при проектировании технологии окончательной ЭХО, и алгоритмы их решения.

Несмотря на внедрение высокопроизводительного оборудования и новых методов обработки, еще сравнительно велика доля ручного труда в общей трудоемкости изготовления отдельных наиболее сложных и ответственных деталей ГТД и в первую очередь – лопаток компрессора, имеющих сложную пространственную форму, относительно низкую жесткость и высокие требования к точности геометрических параметров и состоянию поверхностного слоя. Так, при изготовлении лопатки первой ступени компрессора низкого давления (КНД) двухконтурного двигателя трудоемкость составляет около 30 нормочасов, из которых на окончательную ручную доработку пера лопатки затрачивается более 20 % общей трудоемкости. Суммарная трудоемкость изготовления лопаток составляет почти 40 % от общей трудоемкости двигателя. Поэтому уменьшение окончательной ручной доработки лопаток является важным направлением в снижении общей трудоемкости. Снизить трудоемкость ручной доработки можно путем повышения точности машинной обработки пера лопатки на окончательном этапе формообразования пера. Лопатка, являясь одной из наиболее нагруженных деталей ГТД, определяет ресурс и надежность работы двигателя. Поэтому повышение ресурса работы лопатки объективно способствует повышению ресурса двигателя. Однако индивидуальные особенности рабочего полировщика на ручной слесарной доработке оказывают значительное влияние на качество поверхностного слоя лопаток, вызывая

нестабильность его характеристик. Таким образом, уменьшение объема ручной доработки пера лопатки способствует как снижению трудоемкости изготовления двигателя, так и повышению его ресурса за счет стабилизации характеристик поверхностного слоя.

В качестве метода окончательного формообразования пера в наибольшей степени подходит электрохимическая обработка (ЭХО), т. к. она в сочетании с последующей отделочно-упрочняющей обработкой обеспечивает повышение предела выносливости. Успехи, достигнутые в области освоения малоприпусковых заготовок, привели к тому, что актуальным становится вопрос разработки технологии, позволяющей обрабатывать ажурные заготовки лопаток компрессора высокого давления из труднообрабатываемых материалов. Величина минимального припуска по перу уменьшается при этом до 0,3...0,5 мм, а его неравномерность достигает 0,6...1,3 мм. Таким образом, при незначительном припуске весьма значительна его неравномерность. Припуск не может быть удален за две, три операции, как при обработке пера лопаток КНД. Обработка пера лезвийным и абразивным инструментом становится проблематичной из-за значительного силового и теплового воздействия на ажурное перо заготовки лопатки. В этих условиях ЭХО становится практически единственным методом обработки пера, который может гарантированно обеспечить ненапряженное удаление припуска, исключаящее значительное силовое и тепловое воздействие на

перо, и равномерную эпюру поверхностных остаточных напряжений на всех участках пера после обработки в условиях ограниченных размеров базирующих поверхностей. Однако на сегодняшний день ЭХО не обеспечивает требуемую по чертежу точность пера из-за ряда факторов, сопровождающих процесс вследствие особенностей конструкции лопатки и подчиняющихся закономерностям технологической наследственности. Действие этих факторов иногда может нарушить нормальное протекание процесса ЭХО и вызвать дефекты (короткое замыкание, прижоги, изменение структуры материала). Но, даже если этого не произойдет, их действие всегда обнаруживается после окончания процесса в виде остаточных деформаций пера относительно замка, приводящих к снижению точности обработки.

Кроме того, отсутствие адекватных математических моделей для описания процесса ЭХО и сопутствующих явлений, вызывающих его искажение, приводит к невозможности реализации автоматизированного проектирования технологии изготовления лопаток с использованием ЭХО в качестве окончательной формообразующей. Только всестороннее исследование факторов технологической наследственности, сопутствующих ЭХО пера лопаток ГТД, и выявление закономерностей их изменения может определить способы управления ими и сделать реальным использование ЭХО для окончательной обработки.

Проведены комплексные исследования основных факторов технологической наследственности при ЭХО пера лопаток [1], которые можно разделить на следующие группы.

Геометрические факторы технологической наследственности, которые влияют на точность через геометрию заготовки и формируются в течение всего технологического процесса. Это смещение установочных баз относительно номинального расположения, смещение оси пера относительно замка и погрешность углового расположения пера относительно замка. Экспериментально определены закономерности изменения этих факторов на натурных лопатках. Теоретически и экспериментально установлены меха-

низмы их влияния на точность формообразования [2].

Наследственные факторы состояния материала и обрабатываемой поверхности: остаточные напряжения в поверхностном слое пера перед ЭХО, насыщение поверхности водородом при ЭХО титановых лопаток. Определены закономерности формирования остаточных напряжений при различных вариантах подготовки пера и их влияния на точность формообразования [3, 4] и закономерности наводораживания в зависимости от параметров режима ЭХО, разработана математическая модель наводораживания поверхности различных титановых сплавов при ЭХО в импульсном режиме.

Наследственные факторы, действующие в течение операции ЭХО и обусловленные особенностью конструкции детали. Возникновение этих факторов не обусловлено природой самого метода обработки, а является проявлением специфичности конструкции обрабатываемой детали. Они являются результатом действия явлений, сопутствующих ЭХО пера лопаток. В качестве таких факторов можно назвать термоупругие деформации пера и деформации пера от гидравлических сил [5]. Им соответствуют тепловыделение в теле заготовки и в зоне обработки, а также силовое воздействие потока электролита. Если бы заготовка имела высокую изгибную жесткость и большую площадь токоподвода, то есть другую конструктивную форму, то влияние отмеченных явлений на точность формообразования пера было бы пренебрежимо мало.

Разработаны математические модели процесса ЭХО, а также сопутствующих ему явлений, вызванных особенностью конструкции лопатки, которые можно рассматривать как информацию для создания соответствующих баз данных и выработки рекомендаций по режимам и техническим требованиям на операцию окончательной ЭХО с учетом технологической наследственности при проектировании технологии изготовления лопатки компрессора с помощью PDM-систем.

Кроме того, предложены новые принципы реализации ЭХО для повышения точности размеров второго рода при обработке

нежестких деталей сложной пространственной формы, к которым относятся лопатки: коррекция заготовки относительно электродов, периодическая свободная переустановка заготовки в процессе ЭХО, присоединенный расход электролита. В соответствии с этими принципами разработаны способы и устройства для их осуществления [6, 7]. Эффективность использования принципов и устройств обоснована теоретически и экспериментально. Разработанные способы и устройства могут служить рекомендациями и прототипами оснастки для ЭХО пера лопаток на точность.

Таким образом, создана база для проектирования окончательной ЭХО с учетом влияния факторов технологической наследственности.

Остановимся подробнее на процессе проектирования операции окончательной ЭХО. При проектировании окончательной обработки пера компрессорной лопатки с использованием ЭХО приходится решать некоторые типовые технологические задачи, составляющие суть процесса проектирования. Они связаны со значительными материальными, интеллектуальными и временными затратами, а эффективность их решения определяет в конечном счете уровень разработанной технологии. Общими составляющими этих задач являются сведения по процессу ЭХО, способам его реализации и сопутствующим процессам, оснастке; информация о заготовках лопаток и вариантах их получения. Совокупность задач определяет методологию проектирования окончательной обработки пера лопатки. Обычно при их решении влияние технологической наследственности на точность в явном виде не учитывается, а из опыта предшествующей обработки постулируется, что остаточное смещение пера после ЭХО не превысит некоторой величины в пределах допуска. При решении технологических задач припуск под операцию ЭХО и его неравномерность обычно оценивается только с точки зрения достижения заданной погрешности профиля пера. В результате такого подхода практически неизбежным становится появление брака по причине выхода величины смещения профиля

пера от номинального расположения за пределы допуска, или, если этот брак исправим, то неизбежна ручная доработка профиля пера. Поэтому представляется важным рассмотреть содержание основных задач и разработать алгоритмы их решения с учетом технологической наследственности, то есть с использованием всех аналитических и экспериментальных решений, найденных в результате проведенных исследований. Отличительной особенностью разработанного подхода является, во-первых, широкое использование математического моделирования на ЭВМ, во-вторых, минимальное количество трудоемких экспериментальных исследований, в-третьих, простота использования (на уровне подготовки цехового технолога со средним стажем работы) и, главное, резкое сокращение времени на решение указанных задач при гарантированном исключении выхода лопаток в брак по причине смещения профиля пера.

Наиболее частой задачей при проектировании операции окончательной ЭХО пера является определение возможности получения заданной точности профиля пера и его расположения относительно замка при заданной геометрии заготовки при известных геометрии заготовки и способе ее получения, а также при известных способах реализации ЭХО пера лопатки, электролитах, режимах обработки. Назовем ее первой технологической задачей. Обычно ее решают при встраивании ЭХО в технологический процесс обработки лопатки, рассматривая ЭХО как возможную альтернативу механической обработке пера абразивным или лезвийным инструментом.

Если у технолога есть возможность выбора способов получения заготовки, то решается вторая задача: определение требований к геометрии профиля заготовки лопатки при имеющихся возможностях реализации ЭХО с точки зрения электролита, источника питания (возможных режимов обработки), схемы ЭХО, приспособления и оборудования с целью получения заданной точности профиля пера и его расположения относительно замка. Вторая задача обычно решается в случае безальтернативности ЭХО, как оконча-

тельной формообразующей операции пера лопатки, для выдачи технического задания на получение заготовки лопатки.

Третья задача решается, когда при заданной заготовке, заданном способе реализации ЭХО, электролите и режиме обработки необходимо ответить на вопрос, какую точность профиля пера и его расположения относительно замка можно получить в результате ЭХО. Обычно необходимость решения такой задачи возникает, если лопатки после ЭХО пера не удовлетворяют заданным требованиям по точности. Фактически, это задача «санации технологии обработки пера».

Четвертая задача - выбор наиболее экономичного варианта получения заготовки лопатки при оптимальных электролите, режимах обработки, способе реализации ЭХО для данного материала. Все четыре задачи можно объединить условным названием - «заготовка - конечная точность». Для решения их используются данные по припускам и его неравномерности для заготовки, требуемая точность профиля пера и его расположения относительно замка после ЭХО, имитационная модель ЭХО, банк данных по электролитам и режимам ЭХО для конкретных лопаточных материалов, электронная модель пера лопатки, методика определения деформации пера лопатки при удалении напряженного слоя, методика определения термоупругих деформаций пера лопатки, зависимости деформаций пера от соотношения зазоров при ЭХО.

Решение всех задач подразумевает использование или создание в случае их отсутствия электронных моделей пера лопаток компрессора.

Последовательность решения первой задачи выглядит следующим образом.

1. Создание электронной модели лопатки (или выделение ее из узла компрессора, если есть сборочная 3D - модель узла).

2. Выделение технических требований по точности профиля пера и расположению пера относительно замка.

3. Выделение технических требований по величине минимального припуска и его неравномерности по перу заготовки и установочных базирующих поверхностей по зам-

ку и технологической прибыли на операции ЭХО пера. Выявление распределения смещений пера относительно замка на заготовках, а также определение эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пера заготовки. Распределения смещений пера заготовки сравниваются с величиной наименьшего припуска по перу заготовки. Если поле рассеяния смещений и уводов пера больше половины минимального припуска по перу, рекомендуется использование приспособлений для ЭХО с начальной коррекцией положения лопатки. В противном случае осуществляется ЭХО без коррекции начального положения.

4. Определение наибольшего и наименьшего межэлектродных зазоров при ЭХО пера в соответствии с геометрией пера заготовки.

5. Проведение экспериментов на плоских образцах по определению зависимости линейного съема от межэлектродного зазора при ЭХО на электролите, рекомендуемом для данного сплава, или выбор из банка данных по электролитам зависимости характеристики режима от зазора для известного оптимального электролита.

6. Определение ожидаемой величины конечной погрешности профиля пера при известных величинах наименьшего припуска, его неравномерности и величине начального зазора с помощью имитационной модели ЭХО.

7. Выбор из банка данных эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пера после ЭХО.

8. Определение деформации пера после удаления напряженного слоя материала на пере лопатки после ЭХО по экспресс-методике нагружения конечно-элементной модели пера осредненными активными остаточными напряжениями.

9. Сравнение величины деформации с допуском на расположение пера относительно замка. Если величина допуска больше, чем ожидаемая деформация пера, то рекомендуется осуществлять ЭХО традиционным способом при установке по двум базам без закрепления. В противном случае просчитывается эффективность применения способа

ЭХО с периодической самоустановкой пера и ненапряженным перезакреплением вспомогательной базы.

10. По ожидаемым величинам межэлектродных зазоров и их соотношению определяется максимально возможная деформация пера от потока электролита (по экспериментальным зависимостям).

11. По математическим моделям нагрева пера и его результирующего термоупругого деформирования рассчитывается величина максимально возможной деформации.

12. Суммарная величина деформации по п.п. 10 и 11 сравнивается с величиной допуска на смещение профиля в средних по высоте сечениях пера. Если величина допуска на смещение больше ожидаемой суммарной деформации пера в процессе ЭХО, то рекомендуется проведение ЭХО сплошным электродом. В противном случае целесообразнее использовать гребенчатый электрод (реализующий принцип присоединенного расхода электролита) и применять в токопроводах вставки из металлорезины с целью повышения числа пятен контакта для снижения температуры в его зоне.

13. Выбор оборудования, обеспечивающего ЭХО по выбранной схеме с уточнением по п.п. 3 - 12.

14. Выдача технических заданий на проектирование оснастки для реализации выбранной схемы ЭХО пера.

15. Выбор варианта отделочно-упрочняющей обработки лопатки, рекомендуемой для данного материала из базы данных по отделочной обработке.

Разработаны блок-схемы последовательности решения первой, второй и третьей технологической задачи, которые могут служить методическим руководством при проектировании технологии окончательной обработки лопаток, причем не только электрохимическим методом, так как принципиальным в них является подход с позиций технологической наследственности, учитывающий влияние основных ее факторов на точность формообразования за вычетом блока наводо-раживания, который используется исключительно при ЭХО.

Математические модели, входящие в методику, просты и могут использоваться без

специальной подготовки цеховыми технологами, знакомыми с существом проблемы и обладающими навыками работы с ПК.

Экспериментальные данные по остаточным напряжениям в зависимости от метода обработки, сведения по электролитам, режимам ЭХО по различным лопаточным материалам сведены в таблицы и служат базами данных.

Таким образом, методика проектирования совместно с базами данных может служить эффективным инструментом при ручном проектировании технологии окончательной ЭХО; базой для создания универсальной методики проектирования окончательной обработки пера лопаток или любых деталей низкой жесткости (с соответствующей адаптацией) с учетом технологической наследственности; основой для проектирования технологии лопатки в едином информационном пространстве с использованием PDM-систем.

Список литературы

1. Смирнов Г. В., Проничев Н. Д., Демин М. В. Влияние технологической наследственности на величину остаточных напряжений в поверхностном слое после окончательной вибро-ЭХО пера лопаток ГТД // Новые электро-технологические процессы в машиностроении: тез. доклада Всесоюз. семинара. - Кишинев, 1990. - С. 135-136.
2. Смирнов Г. В., Крашенинников К. П., Потапова Н. И. Влияние погрешностей геометрических параметров заготовки на точность ЭХО пера крупногабаритных лопаток // Сб. Технологические методы повышения качества изготовления деталей авиадвигателей. - Куйбышев: КуАИ, 1980. - С. 28-34.
3. Смирнов Г. В., Проничев Н. Д. Влияние структуры технологического процесса на распределение остаточных напряжений в пере лопаток ГТД / Высокоэффективные методы механической обработки материалов // Сб. Высокоэффективные методы механической обработки авиац. - Куйбышев: КуАИ, 1991. - С. 41- 46.
4. Смирнов Г. В., Шманев В. А., Филимошин В. Г. Влияние остаточных напряжений на точность ЭХО крупногабаритных лопаток ГТД из титановых сплавов // Сб. По-

верхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. – Москва: МДНТП, 1984. - С. 44- 49.

5. Смирнов Г. В., Филимошин В. Г., Антонов А. В. О силовом воздействии электролита на перо лопатки в процессе ЭХО // Сб. Технологические пути повышения качества изготовления авиадвигателей. - Куйбышев, 1986. - С. 56 – 61.

6. А.с. 655497. СССР, МКИ³ В24В 1/04 // В24D 5/00. Способ электрохимической размерной обработки подвижными электродами

/Смирнов Г. В., Бороздин Б. П., Филимошин В. Г., Несмелов Б. М., Шипов Ю. С., Шулепов А. П. (СССР). № 3569413/25-08; Заявл. 31.03.83; Оpubл. 23.10.82, Бюл. №39 //Открытия. Изобретения. 1983. №39.

7. А.с. 179368, СССР МКИ³ В24В 1/04 / В24D 5/00. Электролит для размерной электрохимической обработки / Смирнов Г. В., Демин М. В., Сенина О. А., Проничев Н. Д. (СССР). №3569413/25-08; Заявл. 8.10.92; Оpubл., Бюл. №7 //Открытия. Изобретения. 1993. № 7.

DESIGNING A TECHNOLOGY OF FINAL ELECTROCHEMICAL MACHINING OF GAS TURBINE BLADES WITH REGARD FOR TECHNOLOGICAL HEREDITY

© 2007 G. V. Smirnov

Samara State Aerospace University

The paper deals with the issues of designing a technology for final electrochemical machining (ECM) of gas turbine engine (GTE) blades with regard for technological heredity factors. Classification of technological heredity factors and their influence on the ECM accuracy and surface quality after machining are presented. Principles of modifying the ECM realization pattern are described, the content of the main tasks solved when designing a final ECM technology and algorithms of their solving are given.