

УДК 621.9.047

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРОВ ВТОРОГО РОДА ПРИ ДВУХСТОРОННЕЙ ЭХО ДЕТАЛЕЙ НИЗКОЙ ЖЕСТКОСТИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕРНИЗАЦИИ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ

© 2008 Г. В. Смирнов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Обеспечение заданной точности размеров второго рода при любых видах обработки деталей относительно низкой жесткости является важной проблемой современного авиадвигателестроения. Особую остроту она приобретает при окончательной импульсной электрохимической обработке (ЭХО) пера компрессорных лопаток. Описаны принципы модернизации схемы ЭХО, обеспечивающие получение заданной точности, а также разработанные в соответствии с этими принципами и запатентованные способы и устройства.

Электрохимическая обработка, жесткость, профиль, лопатка, точность, погрешность

При обработке деталей низкой жесткости серьезной проблемой является обеспечение заданной точности размеров второго рода – взаимного расположения обрабатываемых поверхностей относительно базовых. Особенно, если допуски на эти размеры сопоставимы с величиной деформации при обработке. Для уяснения картины рассмотрим проблему на примере двухсторонней электрохимической размерной обработки пера лопатки компрессора. Традиционно двухсторонняя электрохимическая обработка пера лопаток осуществляется при установке заготовки на две установочные базы: замок и вспомогательную технологическую базу. При этом во время установки основное внимание уделяется точности установки основной базы, которой является замок, так как в процессе ЭХО необходимо обеспечить заданную точность профиля по всем сечениям (размер первого рода) и точность расположения профилей пера относительно замка (размер второго рода). Ось замка при установке занимает заданное определенное положение относительно установочных баз приспособления.

В передовых схемах ЭХО вспомогательная технологическая база устанавливается на подводимую опору и закрепляется в ненапряженном положении. Тем самым, с одной стороны, обеспечивается необходимая жесткость заготовки при обработке, и в то же время закрепление вспомогательной базы не вызывает обычного коробления вследствие имеющей место погрешности взаимного расположения установочных баз. В случае, если бы лопатка была абсолютно жесткой

деталью и в поверхностном слое пера не было остаточных напряжений от предшествующей обработки, то все это обеспечивало бы выполнение технических требований по точности профиля и его расположения относительно замка. Конечно, при условии достаточной избирательной способности электролита, оптимальности режимов ЭХО и достаточности припуска на достижение заданной точности размеров.

Если абстрагироваться от конкретных условий и предположить, что все эти условия выполняются, то наличие остаточных напряжений в поверхностном слое и уменьшающаяся жесткость пера по мере съема припуска в процессе ЭХО делают решение задачи о достижении заданной точности пера в процессе ЭХО неочевидным. Особенно в части, касающейся достижения точности размеров второго рода. Дело в том, что достижение точности размеров первого рода за счет самовыравнивания процесса ЭХО реализуется при достаточно большом диапазоне изменения параметров электрохимической обработки.

В то же время на достижение точности размеров второго рода при двухсторонней ЭХО пера оказывают влияние факторы, подчиняющиеся законам технологической наследственности. Действие этих факторов иногда может нарушить нормальное протекание процесса ЭХО и вызвать дефекты (короткое замыкание, прижоги, изменение структуры материала), но главное, даже если этого не произойдет, их действие всегда обнаруживается после его окончания в виде остаточных деформаций пера относительно

замка, приводящих к снижению точности обработки. В частности, это факторы геометрической технологической наследственности, проявляющиеся в погрешностях расположения установочных баз и припусков по перу на заготовках перед ЭХО. Кроме того, процессу ЭХО пера лопаток сопутствуют физические явления, вызванные конструктивной особенностью лопаток – относительно низкой изгибной жесткостью пера, его малым поперечным сечением, отсутствием развитых установочных баз и поверхностей для токоподвода. Низкая изгибная жесткость в процессе ЭХО вызывает значительный нагрев пера и тепловые деформации пера от потока электролита. Остаточные напряжения, наследуемые заготовкой от предшествующей обработки пера, вызывают значительное рассеивание размеров и смещение профилей в сечениях, близких к периферийному, при измерении профиля пера во время закрепления только по одной базе – замку лопатки. Наличие проблемы достижения заданной точности размеров второго рода при двухсторонней ЭХО пера лопатки требует ее подробного рассмотрения.

Нами был выполнен анализ возможности достижения заданной точности размеров второго рода при двухсторонней ЭХО пера лопаток КНД с использованием теории размерных цепей и теории идеального формообразования при электрохимическом растворении, в результате которого было показано, что, во-первых, начальное смещение заготовки копируется с редуцированием (при условии, что измерение остаточных смещений идет по той же схеме, что и перед обработкой, то есть при закреплении по двум базам – замку и технологической прибыли). Если начального смещения пера на заготовке не наблюдается, то после обработки на всех лопатках в средних по высоте и близких к ним сечениях всегда имеет место систематическое смещение сечений в сторону корыта, что является результатом совместного влияния тепловых деформаций пера и силового воздействия потока электролита в межэлектродном зазоре [1]. Во-вторых, если измерение смещений идет при закреплении только по одной базе – замку, то величина смещений профилей пера, особенно в сечениях, близких к периферийным, не коррелируется с на-

чальными смещениями профиля. Ответственность за эти смещения несут остаточные напряжения в поверхностном слое пера, наследуемые с предшествующей обработки, что и было подтверждено нами теоретически и экспериментально [2].

Наличие этих систематических погрешностей и является основной причиной снижения точности размеров второго рода. Колебание параметров, ответственных за их возникновение, приводит к рассеиванию величины смещений.

Для повышения точности размеров второго рода при двухсторонней ЭХО компрессорных лопаток нами было предложены следующие принципы изменения схемы обеспечения их точности. Во-первых, это принцип начальной коррекции заготовки лопатки относительно электродов при двухсторонней ЭХО пера для устранения влияния геометрической наследственности на точность размеров. Во-вторых, принцип свободной периодической самоустановки пера относительно электродов и перезакрепления в процессе обработки. Это позволит устранить влияние деформаций пера при удалении напряженного слоя в процессе ЭХО на точность обработки. И, в-третьих, это принцип «присоединенного расхода электролита», реализация которого позволит ослабить силовое воздействие потока электролита на перо и улучшить отвод тепла, а значит уменьшить термоупругие деформации. В итоге это также уменьшит систематическое смещение средних сечений профиля.

Использование данных принципов для совершенствования схемы обработки пера принципиально возможно потому, что, во-первых, ЭХО является бесконтактным методом и, во-вторых, обладает действием самовыравнивания. Поясним это на примере принципа переустановки пера в процессе ЭХО. Самовыравнивание ЭХО обладает тем преимуществом, что вызванное деформацией пера (за счет удаления напряженного слоя) перераспределение зазоров и припусков, которое имеет место при самоустановке пера относительно электродов-инструментов при последующей обработке, будет нивелировано. То есть, по мере дальнейшей обработки зазоры и припуски в различных точках пера будут выравниваться. Бесконтактность мето-

да обеспечивает самовыравнивание при достаточно большом диапазоне изменения параметров и, в частности, межэлектродных зазоров. Поэтому при достаточно большой избирательной способности электролита не нарушаются условия для обеспечения точности размеров первого рода и создаются возможности для исправления погрешности размеров второго рода, вызванных деформацией пера при удалении напряженного слоя.

Для модернизации схемы ЭХО пера в соответствии с предложенными принципами были разработаны, теоретически и экспериментально обоснованы и защищены способы и устройства [3...10].

Ниже на рис. 1 показано одно из устройств для начальной двойной коррекции лопатки относительно электродов: коррекции в направлении линейного увода главной оси (угол α) и поворота вокруг главной оси.

Использование данного устройства позволяет выровнять начальную неравномерность зазоров между заготовкой и электродами, вызванную геометрическими факторами технологической наследственности. Использование данного устройства целесообразно в том случае, если величина остаточных напряжений в поверхностном слое пера перед ЭХО невелика. В противном случае начальная коррекция зазоров перед ЭХО становится бессмысленной вследствие деформации пера после удаления напряженного слоя.

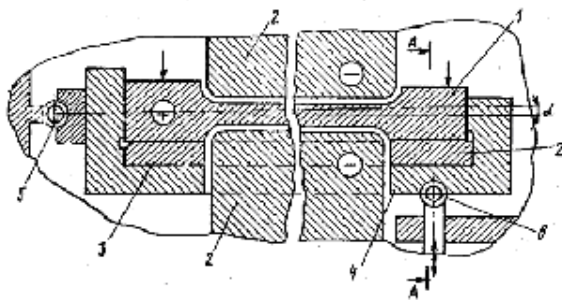


Рис. 1. Схема устройства с двойной коррекцией начального положения лопатки (а.с. №967765)

Для реализации принципа периодической свободной переустановки пера в процессе съема припуска были разработаны и защищены несколько способов и устройств ЭХО (а.с. № 655497, №703286, №1211008) (рис. 2).

По способу *a* перезакрепляется только вспомогательная база лопатки, в устройстве *б* после перезакрепления съём металла идет только в тех местах, где имеется припуск на обработку с помощью электродов, состоящих из автономных секций. По способу *в* реализуется полная обработка лопатки (одновременно замок и перо) с периодической переустановкой лопатки (то есть осуществляется обработка пера и замка с одной установки по перу).

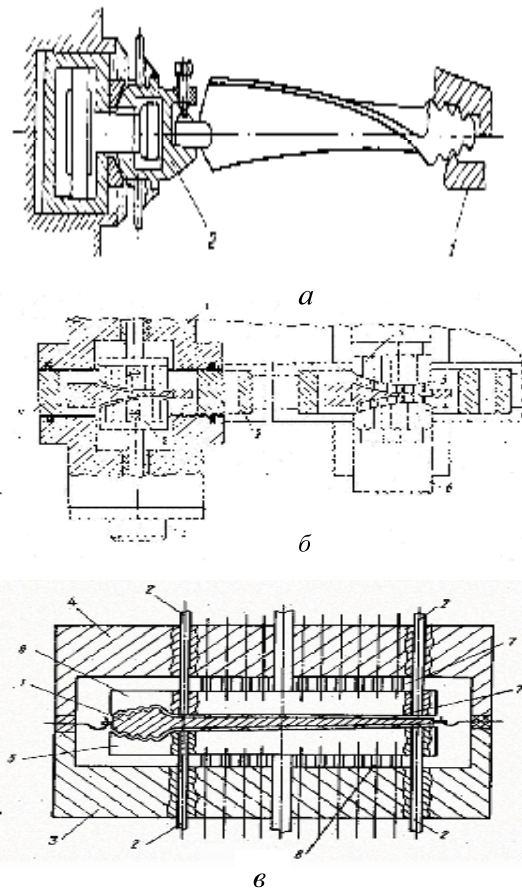


Рис. 2. Способы и устройство ЭХО с переустановкой заготовки относительно электродов: по а.с. № 655497 (а), №703286 (б), №1211008 (в)

На примере наиболее просто реализуемого способа *a* было проведено теоретическое обоснование использования предлагаемого принципа, которое включало оценку возможного перераспределения припусков, погрешности смещения пера, возникшей в результате удаления напряженного слоя и определения возможности исправления изменения деформаций за счёт оставшегося припуска. Использование данного принципа

и соответствующей ему схемы ЭХО даст максимальный эффект исправления погрешности в случае высокой избирательности съёма при ЭХО. Область использования способов и устройств – все типоразмеры лопаток, но для малогабаритных лопаток, заготовки которых получены методом высокоскоростной штамповки, такой способ может стать оптимальным вариантом окончательного формообразования пера при условии использования электролитов с высокой избирательной способностью и оптимальных режимов обработки. Особенно, если учесть нежелательность силового воздействия лезвийного или абразивного инструмента на ажурную заготовку ВСШ.

В соответствии с принципом “присоединенного расхода” был разработан и защищен способ ЭХО “гребенчатым электродом” (рис. 3), при котором происходит выравнивание расходов электролита при имеющейся начальной неравномерности расходов.

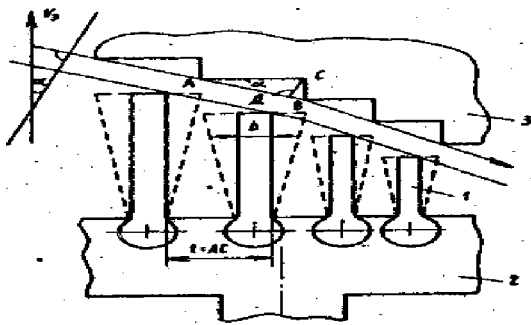


Рис.3. Способ ЭХО «гребенчатым» электродом-инструментом по а.с. №1193893

Этот способ позволяет снизить влияние потока электролита на деформацию пера за счет уменьшения перепада давления с разных сторон, вызванного разностью МЭЗ со стороны спинки и корыта за счет присоединения к расходу между профильной частью электродов и поверхностью лопатки дополнительного расхода между “гребенками” электрода. Во-вторых, он позволяет выровнять расход электролита по одной стороне пера за счет того же фактора и, следовательно, создает более благоприятные условия для удаления продуктов ЭХО из зоны обработки и увеличения теплосъёма с обрабатываемой поверхности. Экспериментальная проверка ЭХО по данному способу на образцах показала уменьшение деформаций δ в 3...6 раз по сравнению с цельным электродом при тех же

соотношениях $a_{\text{вых}}/b$, что хорошо видно из рис. 4.

Использование гребенчатого электрода наиболее эффективно при ЭХО крупногабаритных лопаток, где величины деформаций пера сопоставимы с минимальным межэлектродным зазором и являются препятствием для его уменьшения с целью повышения точности копирования.

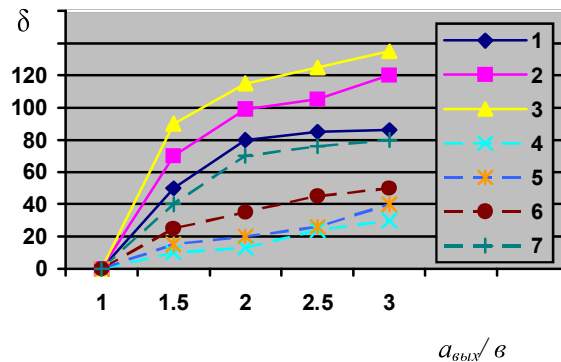


Рис.4. Зависимости деформации δ от соотношения зазоров $a_{\text{вых}}/v$ ($v = 0,6$ мм) при $a_{\text{эл}}/a_{\text{вых}} = 1,0$ (1,4); 1,5 (2,5) и 3,0 (3,6,7) для сплошного (—) и “гребенчатого” (- -) ЭИ. Давление электролита на входе в МЭЗ 0,2 МПа для (1-3,7); и 0,1 МПа для (4-6)

Разработанные способы и устройства по реализации предложенных принципов модернизации схемы двухсторонней ЭХО пера лопаток компрессора могут быть использованы не только при обработке лопаток компрессора, но также любых деталей относительно низкой жесткости, для которых остро стоит вопрос обеспечения точности размеров второго рода. Следует отметить, что способ ЭХО (рис. 2,а) используется в настоящее время при ЭХО пера компрессорных лопаток 9 ступени компрессора из сплава ВТ9 изделия НК-36 на ОАО «Моторостроитель» и показал свою высокую эффективность при максимальной простоте.

Конечно, описанные способы и устройства не исключают использование других средств уменьшения влияния факторов технологической наследственности на точность размеров второго рода. Например, для уменьшения влияния факторов геометрической наследственности можно использовать традиционно применяемую термофиксацию после фрезерования пера с последующим обновлением баз (хотя это и проблематично для крупногабаритных лопаток из-за увеличения затрат). Для уменьшения влияния ос-

таточных напряжений на величину смещений пера после ЭХО можно изменить технологию предварительной обработки пера: например вместо фрезерования штампованного пера в два прохода и последующей термообработки «старение» перед ЭХО крупногабаритных лопаток ограничится старением штампованного пера и последующим распределением припуска по перу. (Эффективность такого подхода была нами доказана [4], и такая подготовка пера крупногабаритных лопаток использовалась на ОАО «Моторостроитель»). Предлагаемые нами способы и устройства для совершенствования схемы ЭХО могут дополнять и традиционно используемые.

Подводя итог, можно заключить, что рассмотренные принципы изменения схемы двухсторонней ЭХО деталей относительно низкой жесткости могут эффективно решить вопрос повышения точности размеров второго рода, что и было продемонстрировано на примере ЭХО пера лопаток компрессора.

Библиографический список

1. Смирнов Г.В., Шманев В.А. Исследование остаточных деформаций при ЭХО пера крупногабаритных лопаток // Сб. Конструктивная прочность двигателей. - Куйбышев: КуАИ, 1983.
2. Смирнов Г.В., Шманев В.А., Филимошин В.Г. Влияние остаточных напряжений на точность ЭХО крупногабаритных лопаток ГТД из титановых сплавов // Сб. Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. - М.: МДНТП, 1984.
3. А.с. 655497. СССР, МКИ³ В23Р1/04// 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). №2540215/25-08; Заявл. 09.11.77; Оpubл. 05.04.79, Бюл. №13 // Открытия. Изобретения. 1979.
4. А.с. 697292. СССР, МКИ³ В23Р1/04// Способ электрохимической обработки крупногабаритных деталей секционным электродом-инструментом / Смирнов Г.В., Филимошин В.Г., Шулепов А.П., Петров Б.И., Бороздин Б.П., Шипов Ю.С., Несмелов Б.М. (СССР). №26533364/25-08; Заявл. 14/08/78;

Оpubл. 15.11.79, Бюл. №42 // Открытия. Изобретения. 1979.

5. А.с. 703286. СССР, МКИ³ В23Р1/04// Устройство для электрохимической обработки / Смирнов Г.В., Филимошин В.Г., Шулепов А.П., Петров Б.И. (СССР). №2546494/25-08; Заявл. 21.11.77; Оpubл. 15.12.79, Бюл. №46 // Открытия. Изобретения. 1979.

6. А.с. 823054. СССР, МКИ³ В23Р1/12// Электрод-инструмент / Смирнов Г.В., Филимошин В.Г., Шулепов А.П., Петров Б.И., Бороздин Б.П., Шипов Ю.С., Несмелов Б.М. (СССР). №2806321/25-08; Заявл. 11.07.79; Оpubл. 25.04.81. Бюл. №15 // Открытия. Изобретения. 1981.

7. А.с. 835695. СССР, МКИ³ В 23Р1/04 // Устройство для электрохимической обработки / Смирнов Г.В., Филимошин В.Г., Шулепов А.П., Петров Б.И., Бороздин Б.П., Несмелов Б.М., Потапова Н.И. (СССР). №2741131/25-08; Заявл. 27.03.79; Оpubл. 07.06.81, Бюл. №21 // Открытия. Изобретения. 1981.

8. А.с. 884927. СССР, МКИ³ В23Р1/12// Электрод-инструмент / Смирнов Г.В., Филимошин В.Г., Шманев В.А., Шулепов А.П., Петров Б.И. (СССР). №2890313/25-08; Заявл. 05.03.80; Оpubл. 02.12.81. Бюл. №44 // Открытия. Изобретения. 1981.

9. А.с. 1211008 СССР, МКИ³ В23Н7/26, В 23 Н 9/10 // Способ двухсторонней электрохимической обработки / Лавров А.С., Смирнов Г.В. (СССР). №3793517/25-08; Заявл. 10.07.84; Оpubл. 15.02.86, Бюл. №6 // Открытия. Изобретения. 1986.

10. А.с. 1582473, СССР МКИ³ В23Н3/04, 7/26 // Способ размерной электрохимической обработки / Смирнов Г.В., Антонов А.В., Дмитриев В.П., Проничев Н.Д., Сенина О.А., Шулепов А.П. (СССР). №4608065/25-08; Заявл. 23.11.88; (не опубликован) (Для служебного пользования).

References

1. Smirnov G.V. and Shmanev V.A. "Permanent deformation research in electrochemical machining of large capacity blades" from Engine Design Strength. Kuybyshev: "Kuybyshev aircraft institute", 1983.
2. Smirnov G.V., Shmanev V.A. and Filimoshin V.G. "Permanent deformation influence on accuracy in electrochemical machining of

large capacity gas turbine engine blades made of titanium alloys” from Surface Coating, Accuracy and Performance Attributes of Machine Components and Tools. Moscow: MHSTP, 1984.

3. Smirnov G.V., Borozdin B.P., Filimoshin V.G. et al. Electrochemical dimensional machining by removable electrode. USSR patent 655497, IIC B 23 P 1 / 04//. Discoveries and Inventions #13, 1979.

4. Smirnov G.V., Borozdin B.P., Filimoshin V.G. et al. Electrochemical dimensional machining of large capacity details by sectional electrochemical machining electrode. USSR patent 697292, IIC B 23 P 1 / 04 // . Discoveries and Inventions # 42, 1979.

5. Smirnov G.V., Petrov B.I., Filimoshin V.G. et al. Electrochemical machining device. USSR patent 703286, IIC B 23 P 1 / 04 // . Discoveries and Inventions # 46, 1979.

6. Smirnov G.V., Borozdin B.P., Filimoshin V.G. et al. Electrochemical machining electrode. USSR patent 823054, IIC B 23 P 1 / 12 // . Discoveries and Inventions # 15, 1981.

7. Smirnov G.V., Petrov B.I., Filimoshin V.G. et al. Electrochemical machining device. USSR patent 835695, IIC B 23 P 1 / 04 // . Discoveries and Inventions # 21, 1981.

8. Smirnov G.V., Shmanev V.A., Shulepov A.P. Electromechanical machining electrode. USSR patent 884927, IIC B 23 P 1 / 12 // . Discoveries and Inventions # 44, 1981

9. Lavrov A.S. and Smirnov G.S. Two-side electrochemical machining method. USSR patent 1211008, IIC B 23 H 7 / 26 // B 23 H 9 / 10. Discoveries and Inventions # 6, 1986.

10. Dmitriev V.P., Smirnov G.V., Antonov A.V. et al. Electrochemical dimensional machining method. USSR patent 1582473, IIC B 23 H 3/04, 7/26. Wasn't published.

THE PROVIDING OF THE GIVEN ACCURACY OF THE SECOND TYPE DIMENSIONS FOR FINISHED PULSE ELECTROCHEMICAL MACHINING OF LOW STIFFNESS DETAILS

© 2008 G. V. Smirnov

Samara State Aerospace University

The providing of the given accuracy of the second type dimensions is an important problem for all kinds of machining for low stiffness details. It is very important problem for finished pulse electrochemical machining of compressor blades. The scheme modification principles for ECM execution are suggested. Manners and means which were designed according to suggested principles describe. Fields for application of the proposed principles and developed manners and means are discussed.

Electrochemical machining, stiffness, shape, blade, accuracy, inaccuracy

Информация об авторах

Смирнов Геннадий Владиславович, доктор технических наук, профессор кафедры производства двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: pdla@ssau.ru. Область научных интересов: электрохимическая обработка деталей ГТД.

Smirnov Gennadiy Vladislavovich, Doctor of Engineering Science - professor of Samara State Aerospace University “Mechanical Material Working” department. E-mail: pdla@ssau.ru. Area of research: electrochemical processing of gas turbine engine components.