

## ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПРОФИЛЯ ПЕРА ПО МЕТОДУ ДВУХСТОРОННЕГО КОПИРОВАНИЯ

© 2023

**Г. В. Смирнов**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[gvsmirnoff@yandex.ru](mailto:gvsmirnoff@yandex.ru)

**А. П. Шулепов**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru)

**А. В. Мещеряков**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[al-mes1@mail.ru](mailto:al-mes1@mail.ru)

Рассматриваются особенности обработки пера компрессорных лопаток. Обсуждается проблема деформаций пера под действием остаточных напряжений, негативно влияющих на точность взаимного расположения пера относительно замка. Отмечаются способы компенсации влияния остаточных деформаций на точность при механической обработке пера и невозможность использования данного подхода при включении в технологию электрохимической обработки пера лопатки компрессора по схеме двустороннего копирования. Проведённый в работе анализ разработанной авторами схемы электрохимической обработки пера лопатки с переустановкой вспомогательной технологической базы и использованием секционных электродов показал эффективность её применения с целью компенсации деформаций пера. Предлагается измерять межэлектродные зазоры в камере обработки после перезакрепления базы с целью сокращения общего времени обработки. Предлагается использовать модернизированную схему ЭХО при проектировании станка с ЧПУ для обработки пера лопатки.

*Компрессорная лопатка; электрохимическая обработка; постоянная деформация; секционный электрод; межэлектродный зазор*

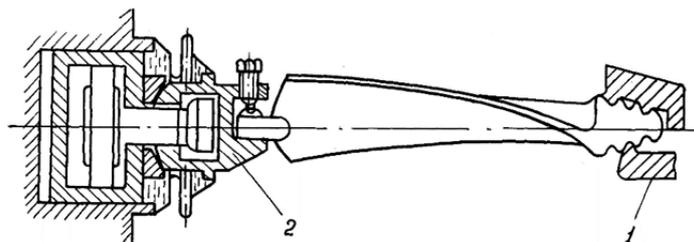
---

*Цитирование:* Смирнов Г.В., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Перспективы модернизации управления процессом электрохимической размерной обработки профиля пера по методу двухстороннего копирования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 1. С. 121-131. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-121-131

Обеспечение точности обработки пера лопаток компрессора ГТД всегда являлось актуальной проблемой. Практически во всех технологических процессах обязательно присутствует ручная слесарная доработка пера для выполнения требований точности, предусмотренных чертежом. Перо лопатки имеет сложную пространственную форму и спроектировано по принципу равнопрочной конструкции. Поэтому при механической обработке, например при строчном двухстороннем фрезеровании дисковыми фрезами или фрезеровании концевой фрезой, перо упруго деформируется под действием сил резания. После окончания обработки и раскрепления заготовки имеют место остаточные деформации пера под действием остаточных напряжений, образующихся в поверхностном слое в процессе обработки. В результате снижается точность таких параметров, как расположение оси пера относительно номинального положения, то есть смещение сечений относительно номинального расположения.

Решению данной проблемы посвящено большое количество работ. Из последних можно отметить комплексный подход на основе моделирования теплофизических процессов в зоне резания при концевом фрезеровании пера на пятикоординатном станке [1]. В этой работе с помощью моделирования деформаций под действием остаточных напряжений, формирующихся в поверхностном слое пера в процессе фрезерования и корректировки параметров резания, авторы предложили пути снижения величины остаточных деформаций пера практически до нуля. Включение в технологию обработки лопатки электрохимической размерной обработки (ЭХО) профиля пера благотворно сказывается на увеличении ресурса её работы в двигателе. Однако при ЭХО профиля пера лопатки по схеме двухстороннего копирования сложно реализовать подобный подход. Во-первых из-за того, что при копировании обрабатывается вся поверхность пера со стороны электродов, хотя растворение металла идёт только в тех частях пера, где величина межэлектродных зазоров будет соответствовать диапазону активного растворения. Во-вторых, зоны растворения по перу распределяются от лопатки к лопатке случайным образом в зависимости от неравномерности припуска на заготовках. В-третьих, и это особенно важно для компрессорных лопаток ротора, остаточные напряжения, наследуемые поверхностью пера от обработки, предшествующей ЭХО, проявляются в полной мере только после окончания ЭХО в виде деформаций пера. Причём схема измерения точностных параметров пера после ЭХО отличается от схемы установки заготовки в процессе ЭХО. При обработке лопатка закрепляется по двум базам – по замку и технологической прибыли, а в процессе измерения – только по замку. Следует отметить, что ЭХО практически не вносит в поверхностный слой собственных остаточных напряжений, а всего лишь удаляет с поверхности пера слой с локализованными в нём «наследственными» остаточными напряжениями от предшествующей обработки. Как правило, это фрезерование пера с целью выравнивания припуска по перу после штамповки. Воздействовать на величину «наследственных» остаточных деформаций можно за счёт введения термической обработки – отпуска, который обнуляет «наследственные» остаточные напряжения, однако при этом удорожается производство.

Существующая схема ЭХО пера заготовки лопатки такова, что действие остаточных напряжений проявляется в тот момент, когда обработка пера закончена и раскрепляется вспомогательная технологическая база. Значит при любом уровне остаточных напряжений в поверхностном слое заготовки перед ЭХО, после окончания обработки и раскрепления технологической базы всегда будет наблюдаться упругая деформация. Для достижения заданной точности размеров второго рода (расположения пера относительно замка) предлагается принципиально изменить схему ЭХО пера. Для этого используется принцип автоматического исправления погрешности размеров второго рода в процессе двухсторонней ЭХО путём периодического изменения положения пера лопатки относительно электродов при его самоустановке и недеформирующего переа закрепления вспомогательной технологической базы в процессе обработки без воздействия на величину наследственных остаточных напряжений (рис. 1).



*Рис. 1. Схема ЭХО с переустановкой заготовки относительно электродов:  
1 – основная технологическая база станка; 2 – самоустанавливающаяся опора*

По мере удаления напряжённых слоёв при съёме припуска перо будет деформироваться. Если вспомогательной технологической опоре придать способность отслеживать каждое новое положение пера и не мешать его самоустановке, обеспечивая при этом необходимую жёсткость технологической системы, произойдёт перераспределение припусков по перу, зазорам и соответственно съёмов материала. Учитывая самовыравнивающее свойство ЭХО, можно предположить, что произойдёт исправление погрешности, вызванной деформацией пера за счёт оставшегося припуска. Реализовать этот принцип можно, используя для установки и закрепления вспомогательной технологической базы самоустанавливающуюся (по каждому новому положению базы) опору. При этом обработка должна быть циклической, то есть состоять из периодов непосредственно съёма напряжённого слоя, раскрепления вспомогательной технологической базы и самоустановки пера в результате удаления напряжённого слоя, закрепления опоры в новом положении и следующего периода съёма материала с поверхности пера. Причём циклы обработки и перезакрепления должны повторяться до полного съёма всего припуска на обработку. Для реализации и развития данного принципа были разработаны способ и устройство ослабления влияния начальных остаточных напряжений в поверхностном слое пера заготовки на его остаточную деформацию после ЭХО.

Самоустанавливающаяся опора позволяет за один двойной ход силового цилиндра произвести перезакрепление вспомогательной базы обрабатываемой заготовки.

На жёсткую опору устанавливается основная технологическая база – замок, относительно которого координируется обрабатываемая поверхность пера. В процессе обработки основная база не раскрепляется. Количество циклов перезакрепления и величина припусков, очевидно, зависят от величины остаточной деформации за один цикл обработки, её изменения по величине и направления от цикла к циклу. Выше было показано, что остаточные деформации зависят от уровня напряжений и характера их распределения по глубине в пере лопатки перед обработкой. Деформации пера проявлялись в виде смещения профилей сечения пера лопаток в сторону спинки. Наибольшая величина смещений имела место в периферийном сечении пера, то есть наиболее удалённом от замка.

С помощью общей теории деформирования криволинейных закрученных брусьев переменного сечения типа пера лопатки было определено приращение деформации пера за каждый цикл обработки и изменение суммарной деформации пера в зависимости от величины снимаемого припуска (рис. 2).

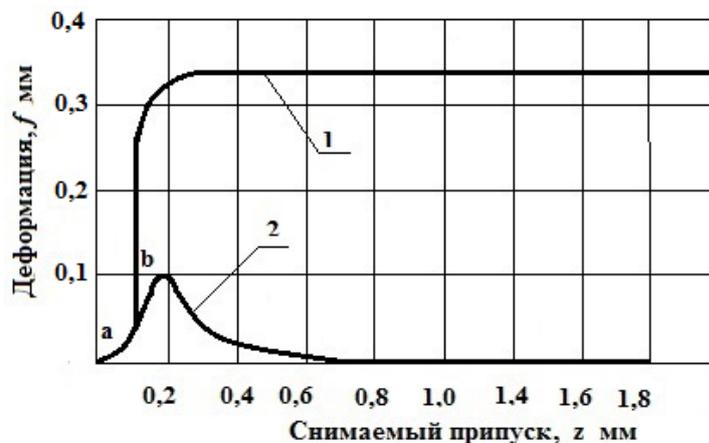


Рис. 2. Расчётные зависимости изменения суммарной деформации пера  $f_p(z_i)$  (1) и приращения деформации  $f_{pi}(z_i)$  (2) от величины снимаемого припуска

Исходными данными служили геометрические характеристики лопатки и размеры поперечных сечений пера после ЭХО, эпюры остаточных напряжений в пере до и после ЭХО, полученные экспериментально (рис. 3), наименьшая величина снимаемого припуска.

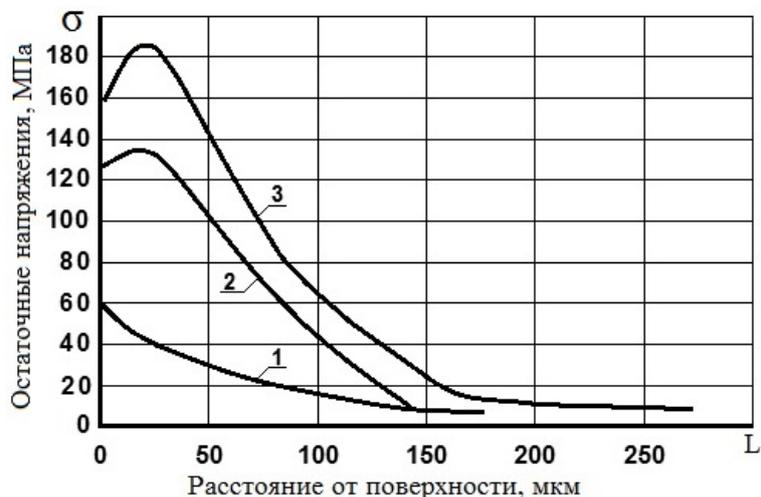


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя пера лопатки 2-й ступени ротора компрессора: 1 – после ЭХО; 2 – активные напряжения; 3 – перед ЭХО

На рис. 2 приведены результаты расчёта – зависимости приращения деформации центра тяжести периферийного сечения пера  $f_{pi}(z_i)$  и суммарной расчётной деформации от величины снимаемого припуска  $f_p(z_i)$ . В расчётах, для упрощения, геометрия поперечных сечений после каждого цикла съёма части припуска принималась одной и той же, соответствующей геометрии пера после ЭХО. Поэтому расчётная величина деформации в начальный период съёма, по-видимому, будет несколько завышена и реальная кривая  $f_{pi}(z_i)$  на участке от 0 до 0,1 мм будет более пологой. Сопоставляя расчётную зависимость  $f_{pi}(z_i)$  с эпюрой активных напряжений 2 (рис. 3), которая получена как разница между эпюрами 3 и 1, можно увидеть, что возрастание  $f_{pi}(z_i)$  на участке  $a - b$  совпадает с ростом кривой 2 на этом же участке. Приращение деформации за цикл съёма  $z_i$  зависит от площади под кривой напряжений на данном участке. Наиболее выгодная форма кривой  $f_{pi}(z_i)$  с точки зрения полного и эффективного исправления остаточной деформации по данному способу – гиперболическая (от максимальных значений в начале съёма припуска при резком их уменьшении до 0 в конце), так как в начале обработки припуск достаточно велик для исправления в последующих циклах обработки погрешности, которая возникла в начале съёма припуска. Зависимость  $f_{pi}(z_i)$  может служить исходным ориентиром при определении числа и временной последовательности циклов перезакрепления при обработке по данному способу, так как позволяет определить закономерность изменения припусков по спинке и корыту с учётом съёма, деформации пера и изменения зазоров.

Рассмотрим схему изменения припусков и зазоров по спинке и корыту лопатки в периферийном сечении пера при двухсторонней ЭХО до и после цикла «съём – закрепление» (без учёта разворота профиля пера) (рис. 4), принимая в расчёт только де-

формацию в плоскости наименьшей жёсткости. Деформация пера в периферийном сечении имеет максимальное значение. Примем  $z_{i-1}$  – суммарные припуски по перу до цикла съёма;  $z_i$  – суммарные припуски по перу после цикла съёма;  $a$  – величина межэлектродного зазора;  $h_i$  – элементарный припуск, снимаемый за один цикл.

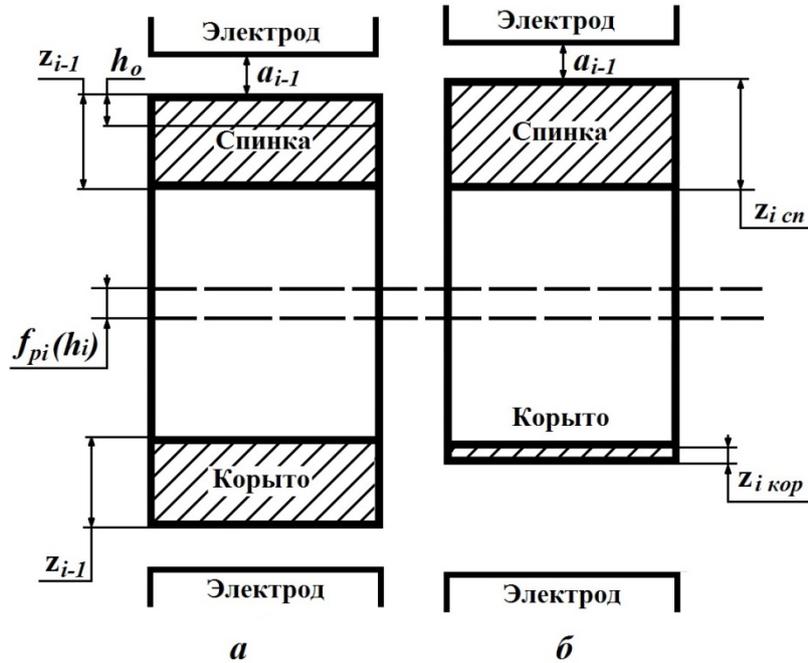


Рис. 4. Схема перераспределения припусков и начальных зазоров до (а) и после съёма слоя  $h_i$  и раскрепления пера лопатки перед началом следующего цикла обработки (б)

Для простоты положим, что припуски по спинке и корыту равны и распределены равномерно. Видно, что после  $i$ -го цикла «съём – раскрепление» и снятия циклового припуска  $z_i$  произошла деформация пера  $f_{pi}(h_i)$ , в результате чего перераспределились припуски по спинке и корыту. По спинке за счет деформации пера в сторону спинки произошло увеличение припуска, по корыту он уменьшился:

- по спинке  $z_i = z_{i-1} - h_i + f_{pi}(h_i)$ ;
- по корыту  $z_{i'} = z_{i-1} - h_i - f_{pi}(h_i)$ .

В следующем цикле обработки начальный зазор между заготовкой и электродом выставляется равным предыдущему  $a_{i-1}$ . ЭХО спинки и корыта пера лопатки компрессора низкого давления (КНД) на станке типа АГЭ-7 осуществляется одновременно при синхронном движении электродов. При контрольном касании (ощупывании) хотя бы одним из электродов обрабатываемой поверхности (в нашей схеме – спинки) электроды останавливаются и отводятся на расстояние начального зазора ( $a_{i-1}$ ) от положения касания. При этом зазор по спинке останется прежним, а по корыту увеличится:

$$a_i'' = a_{i-1} + [f_{pi}(h_i) + h_i].$$

Данные выводы справедливы при непрерывном и монотонном изменении припусков, деформаций и съёмов, что соответствует приведённому на рис. 2 виду эпюры

напряжений 2. В случае, если эпюра напряжений перед ЭХО имеет области с разным знаком напряжений, взаимосвязь между припусками, зазорами и деформациями была бы сложнее. Абсолютная величина деформаций в этом случае была бы меньше. Поэтому, когда эпюра напряжений 2 (рис. 3) не меняет знак, этот случай можно рассматривать как крайний, где влияние деформации на зазор и припуск проявляется в максимальной степени. Необходимо оговорить, что при идеальном формообразовании на больших зазорах и высокой избирательности процесса увеличение зазора по корыту и уменьшение по спинке в данной ситуации способствовало бы исправлению погрешности за счёт самовыравнивания процесса ЭХО. Анализируя структурные формулы для припусков и начальных зазоров, можно прийти к следующим выводам:

1. При обработке лопатки по способу с перезакреплением вспомогательной базы увеличение зазора, вызванное деформацией, может привести к ухудшению условий для выравнивания начальной неравномерности припуска по профилю в тех местах профиля, где произошло увеличение межэлектродного зазора.

2. Изменение припусков по спинке и корыту может быть столь значительным, что оставшегося припуска может не хватить для исправления погрешности смещения профиля пера, вызванной деформацией пера.

С помощью теории идеального формообразования была определена конечная погрешность – остаточное смещение профиля пера от номинального расположения (остаточная деформация)  $\Delta_p$  при ЭХО с перезакреплением и погрешность формы со стороны увеличения зазора  $\Delta_\phi$  в периферийном сечении как наиболее критичном месте с точки зрения условий для самовыравнивания.

При определении возможности исправления остаточной деформации по способу ЭХО с перезакреплением приняты следующие допущения:

- 1) процесс ЭХО подчиняется закономерностям идеального формообразования;
- 2) деформация произойдёт после съёма слоя  $h_0$  (где локализованы остаточные напряжения);
- 3) припуски по спинке и корыту распределены равномерно;
- 4) разворот профиля не учитывается.

Для наглядности представим разницу припусков по спинке и корыту в виде ступеньки (рис. 5) в пределах допуска на разницу припусков по спинке и корыту (так как растворение материала идет одновременно с двух сторон, можно совместить картину на одном рисунке). На схеме  $a_0$  – начальный межэлектродный зазор.

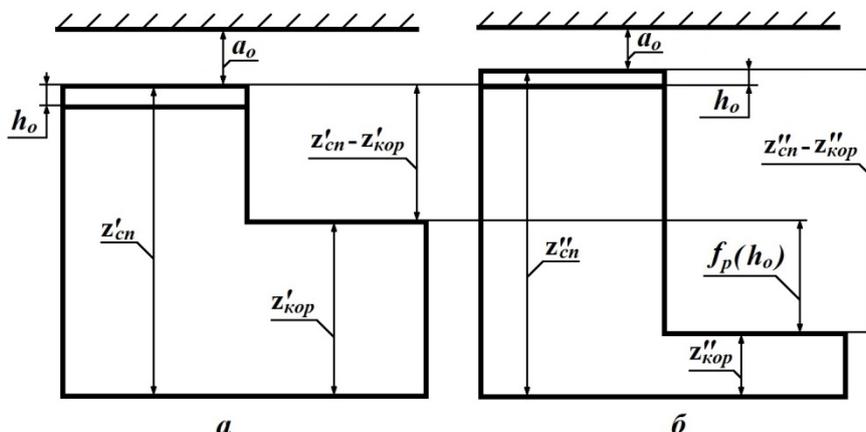


Рис. 5. К определению исправления остаточной деформации:  
 а – соотношение припусков до деформации; б – соотношение припусков после деформации

После съёма слоя материала пера лопатки  $h_0$  с локализованными в нём остаточными напряжениями произойдёт деформация. При этом

$$z''_{кор} = z'_{кор} - h_0 + f_p(h_0), \quad (1)$$

$$z''_{сн} = z'_{сн} - h_0 + f_p(h_0). \quad (2)$$

Для процесса идеального формообразования можно записать [2]:

$$z = k a_y \ln \frac{a_y - a_0}{a_y - a_k}, \quad (3)$$

где  $z$  – величина снимаемого припуска;  $a_y$  – величина установившегося зазора;  $a_0$  – начальный зазор;  $a_k$  – конечный зазор;  $k$  – коэффициент, учитывающий избирательные свойства процесса растворения:  $k = \frac{A_a}{A_y}$ , здесь  $A_a$  – характеристика режима для текущего зазора, учитывающая изменение скорости растворения с изменением величины зазора;  $A_y$  – характеристика режима для установившегося зазора [2].

После перезакрепления в следующем цикле обработки величина начального зазора по спинке выставляется прежней, близкой к величине установившегося зазора:

$$a'_0 = a'_0 = a_y. \quad (4)$$

По корыту величина начального зазора увеличится на величину деформации пера и разница между припусками спинки и корыта вырастет на ту же величину.

После съёма слоя с остаточными напряжениями  $h_0$  дальнейшую обработку можно вести непрерывно без раскрепления заготовки, поэтому с учётом выражений (1 – 4) дальнейшую обработку можно описать следующим соотношением:

$$z'_{сн} - h_0 + f_p(h_0) = k a_y \ln \frac{a_y - (a_0 + z'_{сн} - z'_{кор} + f_p)}{a_y - a_k}. \quad (5)$$

Левая часть уравнения (5) имеет смысл начальной величины разницы припусков спинки и корыта перед повторной обработкой после цикла переустановки пера, то есть величины смещения пера.

Разница между конечным и установившимся зазором  $(a_y - a_k)$ , то есть разница расстояний от электродов со стороны спинки и корыта после съёма припуска, в формуле (5) имеет смысл искомой погрешности – остаточной деформации  $\Delta_p$  пера после цикла обработки, следующего после переустановки. Решив уравнение (5) относительно  $\Delta_p$ , получим:

$$\Delta_p = \frac{a_y - [a_0 + z'_{сн} - z'_{кор} + f_p(h_0)]}{\exp \left[ \frac{(z'_{сн} - h_0 - f_p(h_0))}{k a_y} \right]}. \quad (6)$$

Был проведён расчёт погрешности  $\Delta_p$  по формуле (6) и сравнение её с допустимой по техническим требованиям на операцию ЭХО ( $\Delta_p = 0,45 \dots 0,50$  мм). При выполнении расчёта в качестве исходных данных были использованы технические требования на заготовку перед ЭХО:  $(z_{\text{сп}} - z_{\text{кор}}) = 1,5$  мм;  $z_{\text{кор}} = 2,5$  мм;  $a'_0 = a_y = 0,6$  мм;  $h_0 = 0,3$  мм;  $f_p(h_0) = 0,8$  мм; электролит 10% NaCl + H<sub>2</sub>O; температура электролита 32 °С; подача электрода  $3,3 \cdot 10^{-6}$  м/с.

Коэффициент  $k$ , входящий в формулу (6), принимался равным 1,17 на основании исследований по определению характеристик режима для данного электролита и сплава ВТ9. По результатам расчёта получили  $\Delta_p = 0,313$  мм. Сравнивая полученную величину с допустимой по техническим требованиям на операцию ( $\Delta_p = 0,8$  мм), видим, что расчётная величина почти на 20% меньше допустимой (0,45 мм) и в 2,5 раза меньше суммарной остаточной деформации периферийного сечения (0,8 мм). В расчёте был рассмотрен крайний случай наибольшего припуска по спинке и наименьшего – по корыту. Все остальные будут более благоприятны для исправления указанной погрешности.

Рассмотрено возможное ухудшение условий для выравнивания начальной неравномерности припуска по профилю корыта из-за увеличения зазора по корыту после самоустановки пера, то есть определена ожидаемая конечная погрешность формы по корыту. При этом принимали допущения (2), (4), описанные выше. Начальную неравномерность припуска по корыту представим в виде ступеньки высотой  $\Delta_n$ . Величина ступеньки соответствовала допуску на неравномерность припуска по перу лопатки на заготовке перед началом ЭХО. При этом исходная величина наименьшего припуска по корыту в цикле, следующим за переустановкой пера, определится по аналогии с предыдущим случаем как разница между наименьшей величиной припуска до переустановки, величиной съёма в цикле с переустановкой и деформацией пера в результате переустановки:

$$z''_{\text{нм}} = z'_{\text{нм}} - h_0 - f_p(h_0).$$

Величина начального зазора по корыту определится как сумма величины начального зазора до переустановки, величины съёма и величины деформации пера за цикл переустановки:

$$a''_0 = a'_0 + h_0 + f_p(h_0).$$

Откуда получим для последующей обработки следующее соотношение:

$$z'_{\text{нм}} - h_0 - f_p(h_0) = k a_y \ln \frac{a_y - (a'_0 + \Delta_n + f_p(h_0))}{a_y - a_k}.$$

Если придать величине разницы зазоров  $(a_y - a_k)$  смысл погрешности формы по корыту  $\Delta_\phi$ , то получим:

$$\Delta_\phi = \frac{a_y - [a'_0 + \Delta_n + f_p(h_0)]}{\exp\left[\frac{(z'_{\text{нм}} - h_0 - f_p(h_0))}{k a_y}\right]}.$$

При выполнении расчёта погрешности  $\Delta_\phi$  в качестве исходных данных использованы технические требования на операцию ЭХО и заготовку перед ЭХО. Значение параметров  $\Delta_n = 1,25$  мм;  $z_{нм} = 2,5$  мм приняты по требованиям к точности заготовки пера перед ЭХО. Параметры  $h_0 = 0,3$  мм;  $f_p(h_0) = 0,8$  мм;  $a_y = 0,6$  мм;  $k = 1,17$  мм; состав электролита 10% NaCl + H<sub>2</sub>O; температура электролита 32°C; подача электрода  $3,3 \cdot 10^{-6}$  м/с принимались по аналогии с предыдущим расчётом. Величина  $a'_0 = 2,5$  мм. В результате расчёта получили  $\Delta_\phi = 0,328$  мм. По техническим требованиям на операцию ЭХО  $\Delta_\phi = 0,3 \dots 0,35$  мм. Следовательно ожидаемая погрешность формы при увеличении зазора не превысит допускаемую по технологии. Полученные на основании приведённых выше расчётов данные можно считать достаточно надёжными, поскольку в расчёте принимался коэффициент избирательности процесса  $k = 1,17$  для хлоридного электролита, обладающего сравнительно низкой избирательностью на титановых сплавах. При использовании электролитов с более высокой избирательной способностью условия для исправления погрешности будут более благоприятными.

При ЭХО пера крупногабаритных лопаток компрессора избирательной способности электролита не хватает для полного исправления погрешности, вызванной остаточными деформациями. Поэтому в качестве развития метода цикловой обработки с переустановкой вспомогательной базы было предложено устройство, в котором после перезакрепления съём металла идёт только в тех местах, где имеется припуск на обработку. Это достигается за счёт того, что рабочие участки электродов состоят из изолированных друг от друга секций 2 с изолированным друг от друга питанием (рис. 6).

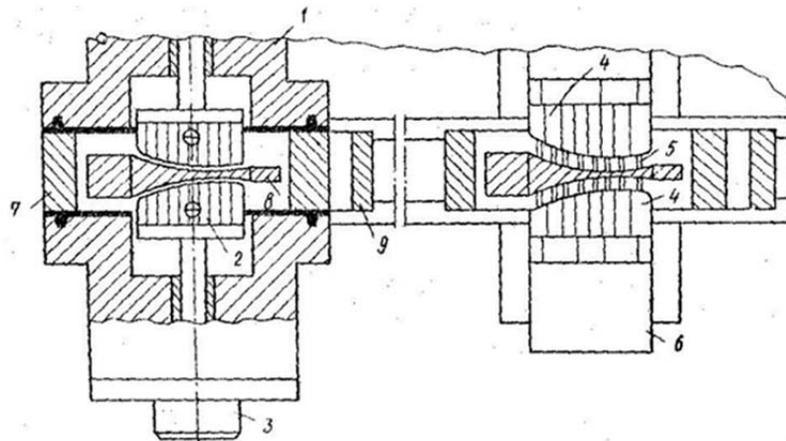


Рис. 6. Схемы электрохимической обработки с переустановкой заготовки относительно электродов и использованием секционных электродов:  
 1 – камера обработки; 2 – секционные электроды; 3 – привод электродов; 4 – зона измерения;  
 5 – контактные щупы измерения припусков; 6 – приводы щупов; 7, 9 – механизмы перемещения лопатки в зону обработки и измерения; 8 – перо лопатки

После перезакрепления пера лопатка 8 перемещалась в зону измерения 4 припуска по перу, определялись участки с наибольшим припуском и секции электродов, которые будут включаться в работу в последующем цикле. Тем самым повышалась локализация процесса съёма, избирательность процесса растворения, шансы на гарантированное исправление погрешности от остаточных деформаций пера.

Реальная обработка пера лопаток по данной схеме показала возможность достижения требуемых точностных параметров в условиях производства.

Следует отметить, что схема была разработана в тот период, когда не существовало надёжных схем измерения межэлектродных зазоров в процессе ЭХО. Поэтому по данной схеме цикл обработки сменялся циклом измерения вне зоны обработки для получения надёжных сведений по оставшемуся припуску и определению рабочих секций электрода, которые необходимо было включать в следующем цикле обработки. Это приводило к существенному увеличению суммарного времени обработки и усложнению конструкции станка. В настоящее время существует множество схем по надёжному измерению величины зазора в зоне обработки [2], поэтому проще определить количество секций электродов, включаемых в следующем цикле обработки. Причём будут включены только те секции, для которых величина межэлектродного зазора будет соответствовать диапазону зазоров активного растворения для используемого электролита. Обработка по предлагаемой схеме будет выглядеть следующим образом: касание электродов, отвод на минимальный рабочий зазор, включение цикла измерения зазоров, определение порядка включения рабочих секций, рабочий цикл, перезакрепление вспомогательной базы, касание электродов и т.д. Следовательно, схема на рис. 6 с небольшой доработкой может быть использована для проектирования станка для ЭХО пера, работающего в автоматическом циклическом режиме с использованием перезакрепления вспомогательной базы в процессе съёма слоя металла с локализованными в нём остаточными напряжениями.

### **Библиографический список**

1. Skuratov D.L., Evdokimov D.V., Fedorov D.G. Mathematical model for determination of the most advantageous conditions for formations of parts of aerospace engineering on the operations of the end milling // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 224. DOI: 10.1051/mateconf/201822401111
2. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / под ред. Б.П. Саушкина: учеб. пособие. М.: Дрофа, 2002. 656 с.

## **PROSPECTS OF IMPROVING CONTROL OVER THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL MACHINING OF THE BLADE AIRFOIL PROFILE USING THE DUPLEX MODE METHOD**

© 2023

**G. V. Smirnov**

Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [gvsmirnoff@yandex.ru](mailto:gvsmirnoff@yandex.ru)

**A. P. Shulepov**

Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru)

**A. V. Mescheryakov**

Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [al-mes1@mail.ru](mailto:al-mes1@mail.ru)

The paper discusses the features of machining of a compressor blade airfoil. The problem of airfoil deformations under the action of residual stresses that negatively affect the accuracy of the relative position of the airfoil relative to the blade root is discussed. Methods of compensating for the effect of permanent deformations on the accuracy in blade machining and the impossibility of using this

approach when the compressor blade is included in the duplex mode technology of electrochemical machining are specified. The analysis of the pattern of electrochemical machining of the blade airfoil with adjustment of the auxiliary technological base developed by the authors and the use of segmented electrodes showed the effectiveness of its use in order to compensate for airfoil deformations. We suggest measuring the interelectrode gaps in the machining chamber after refixturing the base in order to reduce the total machining time. We also suggest using the modernized electrochemical machining scheme when designing a CNC machine for the machining of a blade airfoil.

*Blade; electrochemical machining; permanent deformation; segmented electrode; interelectrode gap*

---

*Citation:* Smirnov G.V., Shulepov A.P., Mescheryakov A.V. Prospects of improving control over the process of electrochemical machining of the blade airfoil profile using the duplex mode method. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 1. P. 121-131. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-121-131

### References

1. Skuratov D.L., Evdokimov D.V., Fedorov D.G. Mathematical model for determination of the most advantageous conditions for formations of parts of aerospace engineering on the operations of the end milling. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 224. DOI: 10.1051/mateconf/201822401111
2. *Fiziko-khimicheskie metody obrabotki v proizvodstve gazoturbinnnykh dvigateley / pod red. B.P. Saushkina: ucheb. posobie* [Physicochemical methods of machining in the production of gas turbine engines / ed. by B.P. Saushkin: study guide]. Moscow: Drofa Publ., 2002. 656 p.