

УДК 621.9.048:658.512.4

А. Р. МАННАПОВ, А. Н. ЗАЙЦЕВ

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ВСТАВОК ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Рассмотрены традиционные технологии изготовления щеточных уплотнений, отмечены их недостатки. Предложена новая конструкция щеточного уплотнения, выполненного в виде комплекта монолитных сегментных вставок, и рассмотрена технологическая схема электрохимического формирования таких вставок. Представлены результаты исследования основных технологических показателей: точности, шероховатости, производительности. Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при проектировании технологических операций и оборудования для импульсной электрохимической обработки (ЭХО) деталей перспективных уплотнительных устройств. *Щеточное уплотнение; электрохимическая обработка; электрод-инструмент; технологические показатели*

Щеточные уплотнения (ЩУ) являются одним из наиболее перспективных классов газоздушных уплотнений, допускающих контакт (касание) уплотняющих поверхностей без ущерба работоспособности конструкции [1, 2]. ЩУ классических конструкций (рис. 1) представляют собой множество плотноупакованных щеточных элементов (металлических щетинок-проволочек), расположенных на внутреннем ободе статора и образующих сплошную кольцевую щетку. Как правило, щеточные элементы (ЩЭ) уложены и жестко закреплены между кольцевыми пластинами. Часто ЩЭ расположены под углом (до 60°) в радиальной плоскости. Упругость ЩЭ позволяет компенсировать колебания радиального зазора, происходящие во время запуска, останова и даже при нормальной работе в условиях высокой вибрации силовых элементов газотурбинной техники, сводя протечки рабочей среды между разделяемыми полостями к допустимому минимуму. Для обеспечения требуемой степени герметичности полостей необходимо, чтобы щеточное уплотнение имело определенное количество плотно уложенных ЩЭ. В одной уплотняющей ступени они укладываются в несколько слоев и образуют довольно широкий массив ЩЭ.

Анализ современных конструкций ЩУ и прогноз их совершенствования позволяет сформулировать для них следующие технические требования.

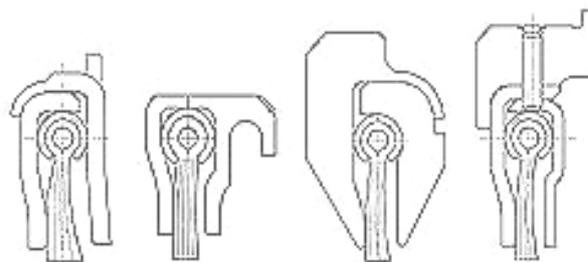


Рис. 1. Некоторые варианты традиционных конструкций ЩУ [3]

Общие требования:

- высокие уплотняющие свойства при любых по величине вибрациях и температурных деформациях;
- компактность конструкции в радиальном и осевом направлениях;
- отказоустойчивость;
- высокие демпфирующие свойства;
- ремонтпригодность;
- возможность установки в существующую газотурбинную технику (модернизация).

Требования к геометрии ЩЭ:

- характерный размер в продольном сечении — 5 ... 15 мм;
- характерный размер в поперечном сечении — 50 ... 300 мкм [4, 5];
- различные формы поперечного сечения (окружность, эллипс и др.);

- различные формы продольного сечения;
- расположение ЩЭ под углом (до  $60^\circ$ ) к радиусу статора как в радиальной, так и в осевой плоскости [4, 6, 7].

Требования к точности обработки:

- повторяемость размеров по сечению ЩЭ — 15 ... 25 мкм;
- повторяемость размеров по высоте ЩЭ — 20 ... 50 мкм.

Требования к качеству поверхностного слоя:

- шероховатость поверхности  $R_a$  0,2 ... 0,8 мкм;

- идентичность химического состава и структуры поверхностного слоя и основы металла ЩЭ;

- отсутствие заусенцев, острых кромок, растягивающих поверхностных напряжений.

Известно, что широкое применение ЩУ сдерживается лишь сложностью автоматизации и организации их изготовления в условиях серийного производства [6].

Также следует отметить, что традиционные технологии изготовления и взаимной ориентации (намотка, навивка, укладка) ЩЭ приводят либо к их чрезмерно плотному прилеганию друг к другу [8], либо к их разупорядочиванию в процессе эксплуатации (образованию перепутанных, лежащих хаотично свободных концов ЩЭ) [9]. В первом случае это ведет к снижению мощности на валу двигателя, снижению ресурса и надежности из-за чрезмерного износа контактирующих пар и из-за оплавления торцов ЩЭ и их спекания в результате повышенной температуры в зоне контакта. Во втором случае это приводит к неравномерному обжатию уплотняемой поверхности.

Технологии соединения ЩЭ друг с другом также обладают рядом недостатков. При сварке и пайке происходит разупрочнение материала ЩЭ в зоне плавления и прилегающих областях, подверженных термическому влиянию, что может стать причиной разрушения и последующего выпадения ЩЭ. Завальцовка и чеканка также не обладают высокой надежностью, так как не исключают выпадения отдельных ЩЭ из пучка, особенно при тяжелых условиях эксплуатации (высоких окружных скоростях и вибрациях).

Технологии обработки контактных поверхностей ЩЭ либо сложны в реализации и малопродуктивны (шлифование, точение), либо не обеспечивают достаточной эксплуатационной надежности, вследствие возникновения напряженных слоев, вызываю-

щих значительную деформацию, дефектов структуры материала и поверхности и пр. (электроэрозия) [6].

Таким образом, имеющиеся технологические проблемы ограничивают конструкторский замысел, что сдерживает развитие конструкций щеточных уплотнительных устройств. Особые трудности возникают в случае усложнения формы продольного и поперечного профиля ЩЭ, например, из соображений придания им особых изгибных и уплотняющих свойств, а также при использовании новых видов жаропрочных сталей и сплавов, труднообрабатываемых традиционными механическими методами.

В значительной степени указанные проблемы могут быть сняты путем применения современной технологии и оборудования для импульсной ЭХО [10–13]. Основные технологические преимущества импульсной ЭХО щеточных элементов состоят в следующем:

- отсутствие износа инструмента;
- отсутствие на обработанной поверхности структурно и химически измененных слоев;
- возможность формирования поперечного профиля ЩЭ практически любой сложности при простом однокоординатном перемещении электрода-инструмента (ЭИ) в направлении к детали;
- возможность программного управления боковым зазором, что позволяет получить заданную форму продольного профиля ЩЭ;
- замена сложного многоэтапного процесса изготовления ЩУ одной операцией импульсной ЭХО;
- возможность формирования ЩЭ практически любой высоты;
- отсутствие влияния твердости и механической прочности обрабатываемого материала на показатели производительности, точности и качества поверхностного слоя;
- возможность достижения точности 10 мкм и шероховатости поверхности  $R_a$  0,2 ... 0,8 мкм при изготовлении выступов щеточных уплотнений с характерными поперечными размерами 50 ... 300 мкм в деталях из хромистых и хромоникелевых сталей, никель-хромовых сплавов;
- технологическое обеспечение конструктивных зазоров между ЩЭ, необходимых для повышения гибкости всей щетки (улучшения демпфирующих свойств) [14];
- возможность формирования ЩЭ непосредственно в корпусе кольца, сегмента или вставки ЩУ;

• возможность получения ЩЭ непосредственно на торцах лопаток [15].

может иметь ЩЭ, расположенные радиально или под углом к радиусу кольцевой щели в радиальной или в осевой плоскости.

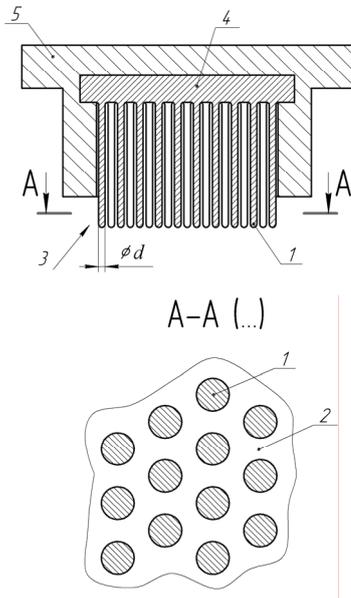


Рис. 2. Конструкция перспективного ЩЭ

Технологические возможности и преимущества метода импульсной ЭХО позволяют спроектировать новые конструкции уплотнительных устройств, удовлетворяющих указанным современным требованиям. Так, уплотнение перспективной конструкции (рис. 2) содержит множество ЩЭ 1, между которыми имеются зазоры 2. Само уплотнение выполнено в виде вставки 3, которая представляет собой пластину 4, выполненную за одно целое со множеством ЩЭ 1. Пластина 4 надежно закреплена в корпусе 5, выполненном в виде кольцевого сегмента. Такое уплотнение

### 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ВСТАВОК

Технологическая схема формирования множества ЩЭ (выступов), расположенных на плоской пластине (рис. 3), основана на известном способе импульсной ЭХО и состоит в следующем [16].

Токпроводящая густоперфорированная мастер-сетка 6 соединена с отрицательным полюсом источника питания 7 и является ЭИ. Она совершает совместно с корпусом 8 электродержателя движение подачи  $V_{ЭИ}$  в направлении обрабатываемой поверхности заготовки 9 и возвратно-поступательное вибрационное движение с частотой  $f_{ЭИ}$ . Заготовка 9 соединена с положительным полюсом источника питания 7 и является анодом. В процессе обработки через отверстие 10 в корпусе 8 электродержателя под давлением  $P_{эл}$  подается электролит. Поток электролита частично стабилизируется в верхней полости 11 корпуса 8 и, проходя через выравнивающую сетку 12, попадает в нижнюю полость 13 и далее в межэлектродный промежуток (МЭП) между мастер-сеткой 6 и заготовкой 9. Внутренняя часть корпуса 8 электродержателя заизолирована (например, покрыта токонепроводящим составом).

Таблица

Условия и параметры режима обработки

№	Параметр	Диапазон значений
1	Начальный торцевой МЭЗ, мкм	20
2	Амплитудное значение импульсного напряжения, В	8 ... 12
3	Длительность импульсов, мс	1,0 ... 2,5
4	Частота подачи импульсов, Гц	50
5	Амплитуда вибрации ЭИ, мм	0,2
6	Частота вибрации ЭИ, Гц	50
7	Скорость подачи ЭИ, мм/мин	30 ... 50
8	Применяемый электролит	8% NaNO <sub>3</sub>
9	Давление электролита на входе в отверстие корпуса электродержателя	100 ... 450
10	Плотность электролита, г/см <sup>3</sup>	1,05 ... 1,06
11	Температура электролита, °С	22 ... 24
12	Удельная электрическая проводимость электролита, См/см	0,055 ... 0,060
13	Кислотность среды, рН	7,15 ... 7,20

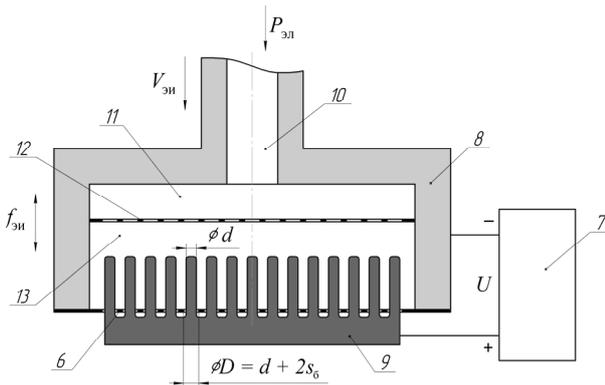


Рис. 3. Технологическая схема изготовления вставки ЦУ

При осуществлении движения подачи электрододержателя с мастер-сеткой 6 происходит заглабление последней в заготовку 9, и напротив отверстий мастер-сетки 6 за счет высокоскоростного анодного растворения на заготовке 9 формируются выступы, по форме подобные отверстиям, но с поправкой на величину бокового межэлектродного зазора (МЭЗ)  $s_6$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Технологические исследования проводились на образцах из хромистой стали 20Х13, которая широко используется в конструкциях паровых турбин. При этом рассматривались следующие технологические показатели: погрешность размеров и формы, шероховатость боковой и торцевой поверхности, производительность процесса.

### 2.1. Условия и режимы обработки

Технологические исследования проводились при условиях и параметрах режима, указанных в таблице.

### 2.2. Погрешность обработки

Оценка точности размеров и формы проводилась на образцах, полученных при постоянных параметрах напряжения  $U$  и скорости подачи ЭИ  $V_{эл}$ , с ЩЭ круглой формы (в поперечном сечении) по следующей методике (рис. 4).

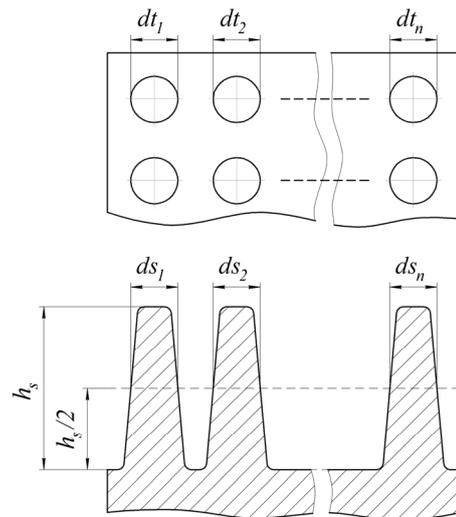


Рис. 4. Схема простановки размеров отверстий в ЭИ (вверху) и ЩЭ на заготовке (внизу)

Точность диаметральных размеров отверстий в ЭИ оценивалась через среднеквадратичную погрешность  $\sigma_{dt}$  на группе из  $N = 10$  отверстий:

$$\sigma_{dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (dt_i - dt_{cp})^2},$$

$$dt_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dt_i,$$

где  $dt_i$  — диаметр  $i$ -го отверстия;  $dt_{cp}$  — положение центра группирования диаметров отверстий в ЭИ.

Аналогично рассчитывалась точность диаметральных размеров ЩЭ, но измерение диаметров проводилось в среднем по высоте сечений ЩЭ:

$$\sigma_{ds} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ds_i - ds_{cp})^2},$$

$$ds_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ds_i,$$

где  $ds_i$  — диаметр  $i$ -го ЩЭ, измеренный в среднем по высоте сечений;  $ds_{cp}$  — положение центра группирования диаметров ЩЭ.

Анализ случайной погрешности диаметров  $ds_i$  и  $dt_i$  показывает, что их поля рассеивания ( $6\sigma$ ) составляют 30 ... 35 мкм (рис. 5). При этом случайная погрешность ЩЭ практически не отличается от случайной погрешности отверстий в ЭИ. Это говорит о том, что случайная составляющая погрешности процесса импульсной ЭХО мала, основная же

доля погрешности вносится систематической составляющей, которая обусловлена наличием бокового МЭЗ  $s_6$ . Последний может быть определен расчетным методом и откорректирован внесением поправочных эмпирических коэффициентов. Данные коэффициенты, вообще говоря, зависят от неточностей самой модели, непостоянства электрических, кинетических и гидродинамических параметров в процессе углубления ЭИ в тело заготовки и пр.

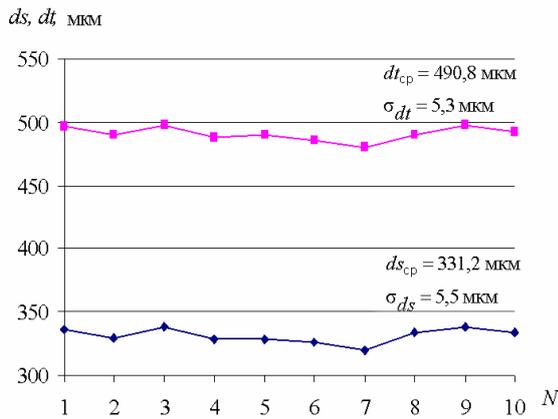


Рис. 5. Точечная диаграмма распределения диаметров  $ds_i$  на заготовке из стали 20X13 и  $dt_i$  в ЭИ

Проводились исследования влияния электрических и гидродинамических параметров на точность обработки. Так, было установлено, что наибольшее влияние на значение бокового МЭЗ  $s_6$  и на диаметр ЦЭ ( $ds_i = dt_i - 2s_6$ ) имеет значение напряжения  $U$  в фазе нижнего положения вибратора. С увеличением  $U$  во всем рассматриваемом диапазоне параметров наблюдается увеличение  $s_6$ .

С уменьшением длительности импульса ( $t_{и} < 2$  мс) существенно снижается влияние на геометрию отверстий и производительность процесса параметров гидродинамики потока электролита, в частности, давления (в диапазоне 100 ... 300 кПа) и объемного расхода, что объясняется стабилизацией параметров процесса за счет обеспечения необходимой интенсивности эвакуации продуктов растворения и выделяющихся газов.

Для оценки формы ЦЭ выбирали его среднюю часть, исключив из рассмотрения области скругления при вершине и комле. Это обусловлено тем, что, во-первых, при высоте ЦЭ 10 мм они будут составлять не более 5 ... 10% длины; во-вторых, размеры и форма этих областей в большей степени зависят от

толщины мастер-сетки и формы поперечного сечения формообразующих отверстий, чем от параметров режима обработки.

Погрешность формы рассматривалась как нецилиндричность ЦЭ, т.е. отклонение профиля продольного сечения (конусообразность,  $\Delta k$ ) ЦЭ, полученное при фиксированных параметрах режима обработки.

В соответствии со схемой измерения и принятыми обозначениями конусообразность определяется по формуле (рис. 6):

$$\Delta k_s = (ds_2 - ds_1) / 2,$$

где  $ds_1$  — диаметр ЦЭ при вершине;  $ds_2$  — диаметр ЦЭ в прикомлевой части.

В результате измерений установлено, что конусообразность ЦЭ при их высоте 10 мм составила около 50 мкм (рис. 7).

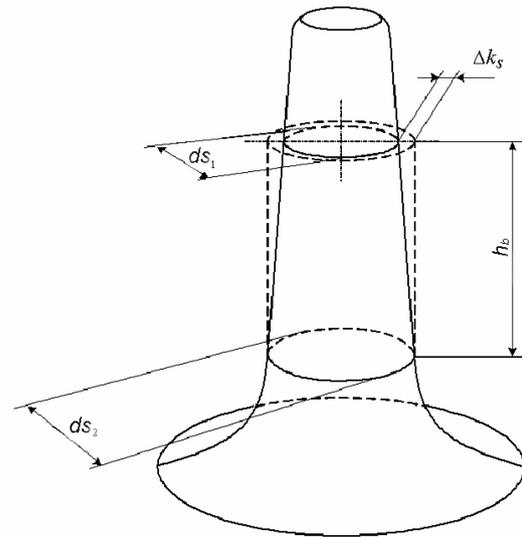


Рис. 6. Расчетная схема для определения конусообразности ЦЭ

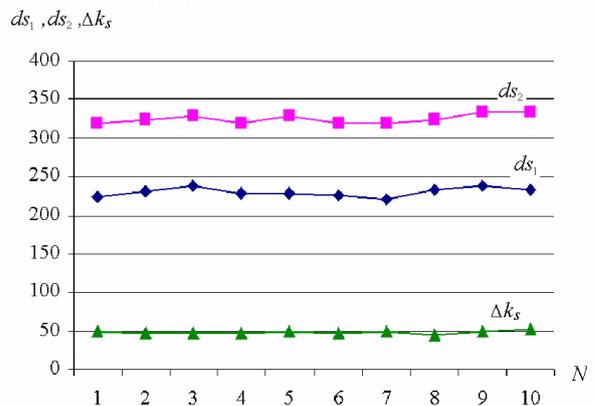


Рис. 7. Точечная диаграмма диаметров вершин  $ds_1$  и комля  $ds_2$  и конусообразности  $\Delta k_s$  ЦЭ

При необходимости получения строго цилиндрических ЩЭ необходимо вести регулирование параметров  $U$  и  $V_{ЭИ}$  в процессе обработки.

### 2.3. Шероховатость поверхности

Прямое измерение параметров шероховатости поверхности полученных ЩЭ требует дорогостоящего оборудования и весьма трудоемко. В связи с этим была использована косвенная методика оценки шероховатости. Суть ее состоит в том, что шероховатость поверхности при обработке хромистых сталей в нитратных электролитах в основном зависит от плотности тока (рис. 8). Таким образом, оценив (расчетным путем) плотность тока в торцевом и боковом МЭП и используя зависимость  $R_a(j)$ , можно оценить шероховатость ЩЭ по боковой, комлевой и торцевой поверхности.

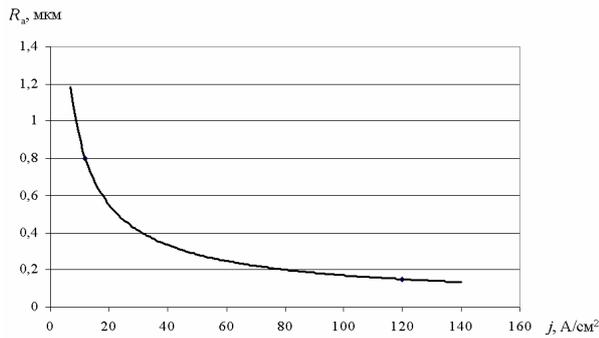


Рис. 8. Зависимость  $R_a$  от плотности тока при ЭХО образцов из стали 20Х13

Распределение плотностей тока по обрабатываемой поверхности ЩЭ показано на рис. 9.

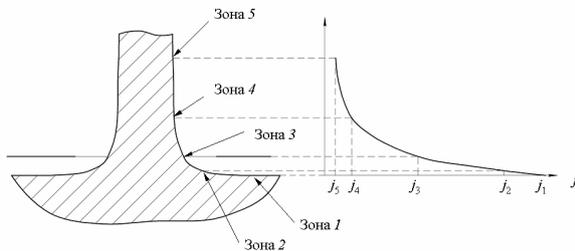


Рис. 9. Схема распределения плотностей тока по обрабатываемой поверхности ЩЭ

Расчетная оценка соотношения плотности тока в различных зонах показывает, что при торцевом зазоре  $s_T = 15$  мкм и высоте ЩЭ

6 мм процентное отношение плотностей тока составляет:

$$j_1 : j_2 : j_3 : j_4 : j_5 = 100 : 90 : 40 : 10 : 5.$$

Экспериментально определенная плотность тока в торцевом зазоре (зона 1) равна  $j_1 = 120$  А/см<sup>2</sup>. В соответствии с соотношением плотность тока в зонах 4 и 5 составит 6..12 А/см<sup>2</sup>. Для данных плотностей шероховатость боковой поверхности ЩЭ для стали 20Х13  $R_a$  0,8...1,6 мкм, шероховатость прикомлевой и торцевой поверхностей  $R_a$  — 0,1...0,2 мкм.

Таким образом, полученные параметры шероховатости удовлетворяют современным техническим требованиям к качеству поверхностного слоя ЩЭ.

### 2.4. Производительность процесса

В связи с тем, что торцевая площадь обработки практически не изменяется, а боковой зазор асимптотически стремится к некоторому значению, производительность может быть оценена скоростью подачи, при которой обеспечивается минимально допустимый равновесный торцевой МЭЗ. Такую оптимальную скорость позволяет получить система автоматического управления станком, принцип работы которой описывался в работе [7].

На рис. 10 приведена зависимость скорости подачи от величины заглубления  $h$  ЭИ в тело заготовки из стали 20Х13. Как видно из графика, средняя скорость формирования массива ЩЭ составляет 35...45 мкм/мин. Таким образом, ЭХО вставки с ЩЭ высотой 10 мм займет приблизительно 250 мин.

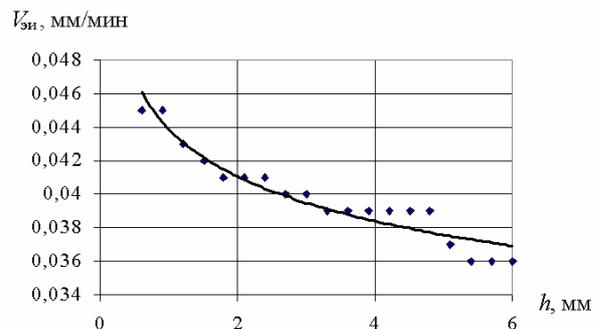


Рис. 10. Зависимость  $V_{ЭИ}$  от величины заглубления ЭИ

### 3. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Технологические возможности метода импульсной ЭХО для получения элементов щеточных уплотнений подтверждаются результатами экспериментов. Так, например, были получены натурные образцы с различной формой ЩЭ в поперечном (рис. 11) и продольном (рис. 12) сечениях, наклонных ЩЭ (рис. 13) и ЩЭ на торце лопатки (рис. 14).



Рис. 11. ЩЭ с различной формой поперечного сечения

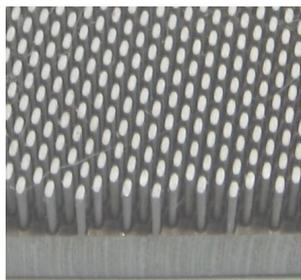


Рис. 12. ЩЭ с различной формой продольного сечения

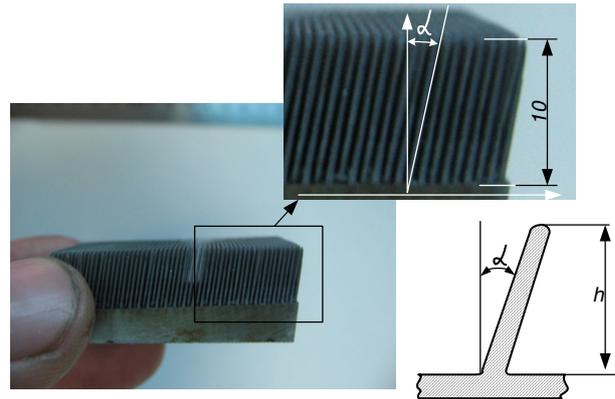


Рис. 13. Общий вид (слева) и эскиз (справа) наклонных ЩЭ ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $h = 10$  мм) на вставке из стали 20X13



Рис. 14. ЩЭ, сформированные на торце лопатки

На основе результатов проведенных исследований в НИИ проблем технологии электрохимической обработки был разработан и совместно с Троицким станкозаводом изготовлен специальный станок (рис. 15) модели 4420Ф11М для электрохимического формирования вставок ЩУ.

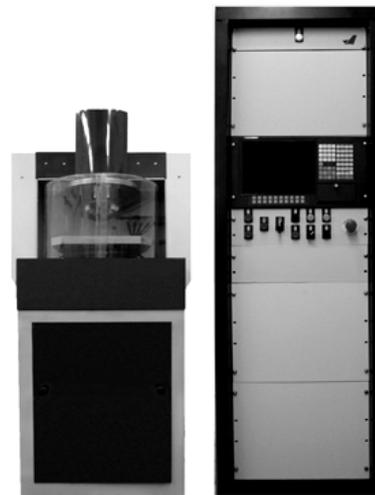


Рис. 15. Электрохимический копирующе-прошивочный станок 4420Ф11М с программным управлением

## ВЫВОДЫ

1) Показаны технологические преимущества метода импульсной ЭХО для формирования вставок перспективных конструкций ЩУ.

2) Предложена конструкция перспективного ЩУ, выполненного в виде закрепленных в статоре монолитных вставок со множеством ЩЭ.

3) Приведены режимы обработки и технологические показатели процесса импульсной ЭХО вставок ЩУ.

4) Показана практическая возможность и приведены примеры технической реализации импульсной ЭХО щеточных элементов различного профиля в продольном и поперечном сечении.

5) Предложена методика оценки параметров шероховатости боковой, комлевой и торцевой поверхности ЩЭ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brush seals** // MTU Aero Engines [Электронный ресурс] ([http://www.mtu.de/en/technologies/manufacturing\\_processes/brush\\_seals/technology/advantages/index.html](http://www.mtu.de/en/technologies/manufacturing_processes/brush_seals/technology/advantages/index.html)).
2. **Brush seal upgrades for GE gas turbines** // Powmat Ltd [Электронный ресурс] (<http://www.powmat.com/brush.html>).
3. **Brush seals** // MTU Aero Engines [Электронный ресурс] ([http://www.mtu.de/en/technologies/manufacturing\\_processes/brush\\_seals/technology/configurations/index.html](http://www.mtu.de/en/technologies/manufacturing_processes/brush_seals/technology/configurations/index.html)).
4. **Полегаев, В. Н.** Пат. 2076256 РФ, МПК6 F 16 J 15/00, F 16 J 15/16. Способ изготовления щеточных уплотнений ГТД / В. Н. Полегаев, В. А. Гейкин, В. М. Крайнев [и др.] // Б.И. 1997. № 9.
5. **Плона, Д.** Пат. 2296866 РФ, МПК8 F 01 D 11/02. Уплотняющее устройство для турбины высокого давления турбомшины / Д. Плона, Г. Дюссере-Тельмон // Б.И. 2007. № 10.
6. **Зрелов, В. В.** Технология щеточных уплотнений / В. В. Зрелов, К. П. Крашениников // Совершенствование технологии изготовления деталей в авиастроении. 1996. С. 65–74.
7. **Шляхтин, Е. А.** Пат. 2016304 РФ, МПК5 F 16 J 15/00. Щеточное уплотнение / Е. А. Шляхтин, В. А. Зрелов // Б.И. 1994. № 13.
8. **Bridges, S. A.** Patent GB 2001400, F16J 15/54, publ. 1977. Brush seal winding / S. A. Bridges.
9. **Horst, V.** Patent US 4730876, F16J 15/32, publ. 1987. Method and apparatus for manufacturing brush seals / V. Horst [et al].
10. **Зайцев, А. Н.** Прецизионная электрохимическая обработка импульсным током / А. Н. Зайцев, И. Л. Агафонов, Н. А. Амирханова [и др.]. Уфа : Гилем, 2003. 196 с.
11. **Зайцев, А. Н.** Технология и оборудование для прецизионной электрохимической размерной обработки / А. Н. Зайцев, Н. З. Гимаев, С. В. Безруков [и др.]. М. : ВНИИТЭМР, 1990. 63 с.
12. **Зайцев, А. Н.** Прецизионные электрохимические копировально-прошивочные станки нового поколения / А. Н. Зайцев // Экономика и производство. 2002. № 1. С. 38–41.
13. **Зайцев, А. Н.** Технология и оборудование для прецизионной электрохимической размерной обработки / А. Н. Зайцев [и др.] // Технология металлов. 2000. № 10. С. 20–24.
14. **Михайлов, С. В.** А.с. 1484033 СССР, F 16 J 15/16. Щеточное уплотнение / С. В. Михайлов [и др.] // Б.И. 2005.
15. **Резник, В. Е.** А.с. 1799058 СССР, МПК7 F 01 D 5/18. Рабочая лопатка газовой турбины / В. Е. Резник, Г. М. Горелов, С. В. Михайлов [и др.] // Б.И. 2005. № 26.
16. **Zaitsev, A. N.** Performing holes of small diameter in steel foil using method of multielectrode precise electrochemical machining / A. N. Zaitsev [et al] // Proc. of the 12th Intern. symposium for electromachining. Aachen, 1998. P. 555–564.

## ОБ АВТОРАХ



**Маннапов Альберт Раисович**, асп. Дипл. инженер по спец. «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов» (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. процессов электрофизич. и электрохимич. обработки материалов.



**Зайцев Александр Николаевич**, проф. каф. ОиТСП. Дипл. инженер по спец. «Технология машиностр., металлореж. станки и инструмент» (УГАТУ, 1972). Д-р техн. наук по проц. физ.-техн. обраб. и САПР (Воронежск. политехн. ин-т, 1991). Иссл. в обл. процессов электрофизич. и электрохимич. размерн. обработки материалов.