

УДК 621.9.048:658.512.4

С. П. ПАВЛИНИЧ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведен анализ тенденций совершенствования конструкций деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Отмечены проблемы традиционных технологий. Определены области рационального использования импульсной электрохимической обработки (ИЭХО) в производстве ГТД. Показан современный технологический уровень и перспективы развития ИЭХО. Приведены примеры новых технологических процессов ИЭХО при изготовлении ответственных деталей ГТД из новых материалов. *Электрохимическая обработка; электрод-инструмент; газотурбинный двигатель; лопатки; отверстия; микрорельеф; аэродинамические уплотнения*

Авиадвигателестроительная промышленность является одной из наиболее наукоемких и высокотехнологичных отраслей народного хозяйства. Именно в ней внедряются все самые прогрессивные и прорывные технологии, используемые в дальнейшем в изделиях энергетического машиностроения. Во многом это обусловлено следующими основными тенденциями в конструировании новых образцов ГТД:

- применение новых сплавов на основе никеля, хрома и титана, композиционных и интерметаллидных материалов с повышенными физико-механическими и теплофизическими свойствами;
- усложнение формы базовых деталей (блиски, блинги и др.), сопровождающееся уменьшением общего количества деталей;
- повышение точностных характеристик деталей;
- повышение требований к качеству поверхностного слоя;
- регуляризация и текстурирование поверхностей деталей с целью придания им специфических свойств (обтекаемость газами и жидкостями, прирабатываемость, износостойкость, маслоемкость);
- снижение массы ряда деталей (пустотелые элементы конструкции, полые лопатки вентиляторов и тонкостенные лопатки компрессоров);

- смещение характерных геометрических размеров элементов деталей в микронную и нанометрическую область.

Механические методы обработки не всегда позволяют эффективно решать поставленные конструкторами задачи, что обусловлено значительными силами резания, приводящими к макродеформациям, наличием поверхностно-деформированного слоя, снижающего усталостную прочность и пр., либо это экономически нецелесообразно по причине большого износа инструмента или высокой трудоемкости. В ряде случаев (прошивание микроотверстий, создание специфических микрорельефов) применение механических методов принципиально невозможно. Все это заставляет во многих случаях отказаться от их применения и искать решения в области нетрадиционных технологий и их комбинаций: электроэрозии, электрохимии, лазерной, гидроабразивной обработки и других. Таким образом, меняется и вектор технической политики предприятий в отношении технического перевооружения.

При производстве геометрически сложных и высокоточных деталей из труднообрабатываемых механическими методами материалов вполне обосновано применение электрофизических и лучевых методов обработки. Однако, имея ряд неоспоримых преимуществ, они не всегда обеспечивают требуемые показатели по качеству поверхностного слоя (из-за наличия зон термического влияния) и

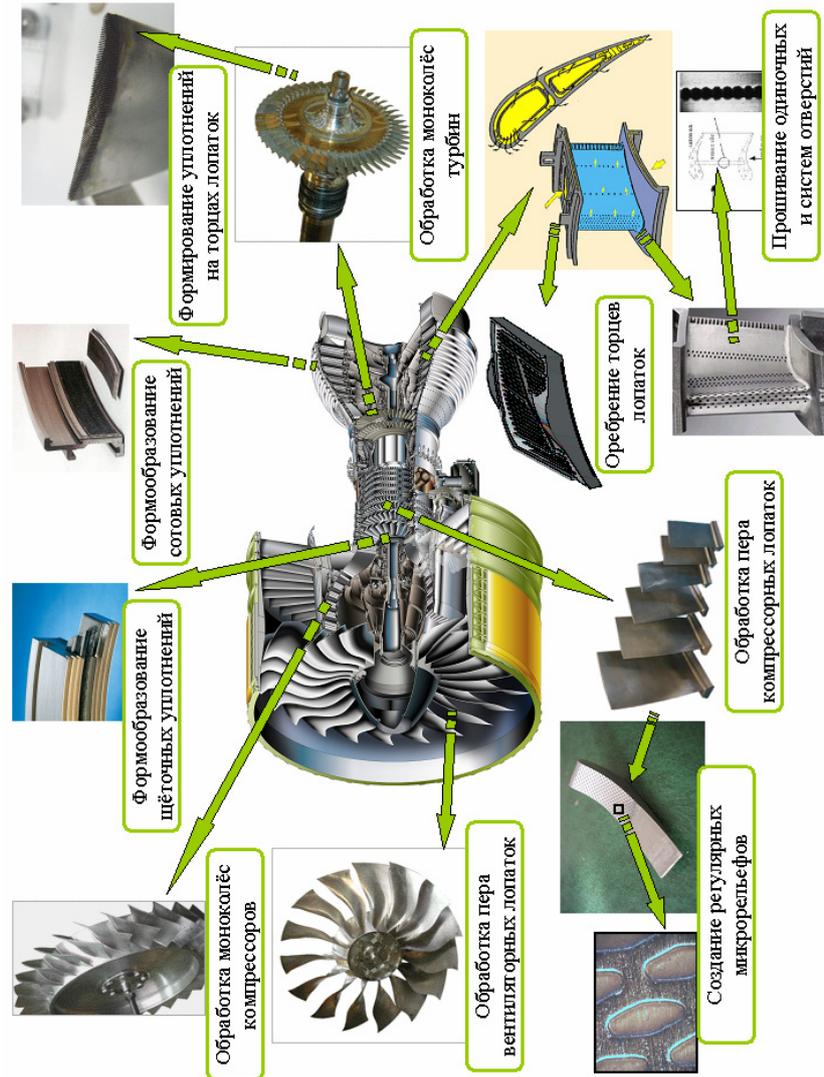


Рис. 1. Декомпозиция конструктивного облика ГТД по технологическим задачам ИЭХО [1–9]

подчас не позволяют получить элементы конструкций микрометрического диапазона.

Электрохимические методы обработки лишены указанных недостатков, но требуют развития, специализации и интеграции с другими методами.

1. ПРЕИМУЩЕСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЭХО

В основе ИЭХО лежит процесс анодного электрохимического растворения материалов в среде электролита под действием импульсного тока высокой плотности. Импульсный характер воздействия позволяет создать существенную начальную неэквипотенциальность поверхности, способствующую повышению точности копирования, и достичь высоких плотностей тока, способствующих повышению производительности и снижению

шероховатости поверхности. Незначительное термическое и механическое воздействие на обрабатываемую поверхность, отсутствие износа инструмента и независимость технологических показателей от прочности и твердости обрабатываемого материала создает сегодня перспективу самого широкого применения данного метода в производстве деталей ГТД.

Рассмотрим возможные приложения ИЭХО на примере типового современного ГТД семейства GP7000 (рис. 1). Декомпозиция конструктивного облика ГТД позволяет, во-первых, систематизировать технологические проблемы, стоящие перед ИЭХО; во-вторых, определить общие подходы к решению проблем для различных деталей и конструктивных элементов.

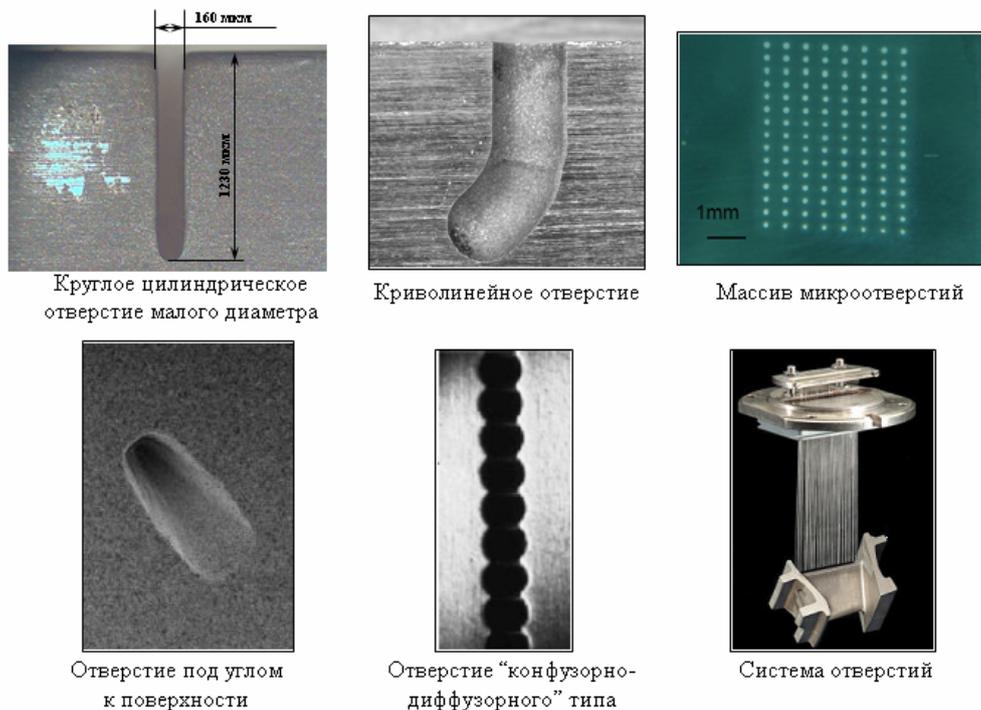


Рис. 2. Примеры деталей с отверстиями, полученными методами ЭХО и ЭЭО [8, 9, 12, 13]

Анализ конструктивных особенностей деталей позволяет разделить технологические задачи ЭХО на следующие группы (рис. 1):

- прецизионная обработка отверстий малого диаметра и сложного профиля;
- обработка проточной части лопаток;
- создание регулярных микрорельефов на поверхностях деталей;
- формообразование элементов аэродинамических уплотнений;
- обработка новых труднообрабатываемых резанием материалов.

Теперь рассмотрим более подробно конструктивные особенности деталей и их элементов, технические требования к ним и технологические возможности ИЭХО в решении имеющихся проблем.

2. ПРОШИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ

В деталях современных ГТД имеются отверстия с высокими требованиями по точности (допуск на диаметр — до $0,002 \dots 0,02$ мкм) и качеству поверхностного слоя. К таким деталям относятся лопатки турбины, кольца, экраны, панели, детали топливomasляной аппаратуры и другие. Имеется тенденция к уменьшению диаметров (до $0,02 \dots 0,5$ мм), увеличению относительной глубины ($h/d > 25 \dots 100$), уменьшению угла наклона оси отверстий к поверхности (ме-

нее 20°), увеличению их количества в деталях ГТД [10, 11].

Для получения таких отверстий традиционно применяют электроэрозионную, электронно-лучевую и лазерную обработку. Тем не менее, физическая сущность и специфические особенности этих методов не позволяют избежать конусности, наличия зоны термического влияния (измененного слоя $h_{\text{изм}} = 20 \dots 50$ мкм), проблем с правкой и коррекцией многоэлектродного инструмента вследствие износа (при эрозии) и ограничений по толщине прошиваемого материала (при лучевой обработке). Поэтому в некоторых случаях наиболее рациональной альтернативой является применение ЭХО как в качестве основной (прошивочной), так и окончательной (удаление измененного слоя) операции.

Следует отметить, что в последние годы появились электрофизические и электрохимические технологии, позволяющие получать отверстия диаметром более 5 мм с криволинейной осью [12] и отверстия с конфузно-диффузным продольным профилем для высокоэффективного внутреннего охлаждения турбинных лопаток [9] (рис. 2).

Достигнутый технологический уровень ИЭХО позволяет при обработке хромистых сталей и сплавов достичь точности $0,01 \dots 0,02$ мм, шероховатости Ra $0,1 \dots 0,2$ мкм, линейной скорости съема

0,07 ... 0,12 мм/мин при прошивании отверстий диаметром 0,05 ... 0,5 мм и соотношении $h/d < 10$ [14, 15]. Создано и серийно производится оборудование для ИЭХО узких, криволинейных и сложнопрофильных отверстий.

Основные пути совершенствования ИЭХО в области прошивания отверстий:

- повышение производительности процесса (в частности, за счет разработки новых технологических схем, одновременного прошивания нескольких отверстий и интеграции ИЭХО с другими методами);
- разработка технологических схем формообразования криволинейных отверстий при $d < 2$ мм (путем применения станков со сложной кинематикой, гибких электродов и пр.);
- разработка новых схем регулирования величины МЭЗ, позволяющих формировать сложные профили отверстий в поперечном сечении;
- увеличение относительной глубины прошивания отверстий до $h/d = 20$ и выше при $d < 1$ мм;
- повышение точности обработки (вплоть до 0,001 мкм) за счет увеличения локализации процесса.

3. ОБРАБОТКА ПЕРА ЛОПАТОК

Как известно, лопатки компрессоров являются самыми массовыми и в то же время одними из самых нетехнологичных деталей ГТД. В структуре общей трудоемкости их изготовление составляет 20 ... 30%. Из них до 50 ... 70% занимают полировальные работы, а коэффициент использования материала, как правило, не превышает 0,1 ... 0,2 [16, 17].

Для данного класса деталей ЭХО находит наиболее широкое применение. По данным зарубежной печати, до 80% лопаток изготавливается методом круговой ЭХО (рис. 3). Она обеспечивает устойчивую обработку широкой номенклатуры лопаток, в 3 раза сокращает цикл их изготовления за счет исключения ручной доводки при формировании профиля и в 3 ... 4 раза снижает их себестоимость. Кроме этого, отмечается, что лопатки после ЭХО имеют повышенную газодинамическую устойчивость, пониженный разброс частот собственных колебаний, повышенную усталостную прочность за счет уменьшения остаточных напряжений [17].

В конструкциях современных малощумных вентиляторов и высоконапорных компрессоров находят широкое применение лопатки, спроектированные на основе трех и

четырёхмерного компьютерного моделирования нестационарных турбулентных течений [2]. Сложно-напряженное состояние лопаток в процессе эксплуатации обуславливает жесткие требования, предъявляемые к геометрии (точность изготовления по I-му классу [21]), к качеству поверхностного слоя (Ra 0,1 ... 0,2 мкм, отсутствие химических и структурных изменений) и к их прочностным характеристикам. Все это делает в ряде случаев невозможным окончательную обработку таких лопаток традиционными механическими методами и обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования технологии ЭХО.

В ГТД все большее применение находят моноколеса и крыльчатки, при обработке лопаток которых возникают дополнительные сложности, связанные с ограниченными размерами межлопаточного пространства. В сравнении с фрезерованием технология ЭХО имеет ряд значимых преимуществ (указанных выше) и особенно эффективна в серийном производстве и при изготовлении моноколес из высокопрочных сталей и никелевых сплавов, трудно поддающихся резанию [22].

Известно, что зарубежные производители ГТД (такие как General Electric Company, MTU Aero Engines GmbH, Volvo Aero Corporation и др.) успешно применяют ЭХО как в качестве операции предварительного формообразования межлопаточного канала моноколес с использованием непрофилированных электродов [23, 24], так и для размерной обработки пера лопаток профильными электродами-инструментами (рис. 4) [25, 26].



Рис. 4. Моноколесо, обработанное методом ЭХО и профильные электроды-инструменты (по материалам MTU Aero Engines GmbH)

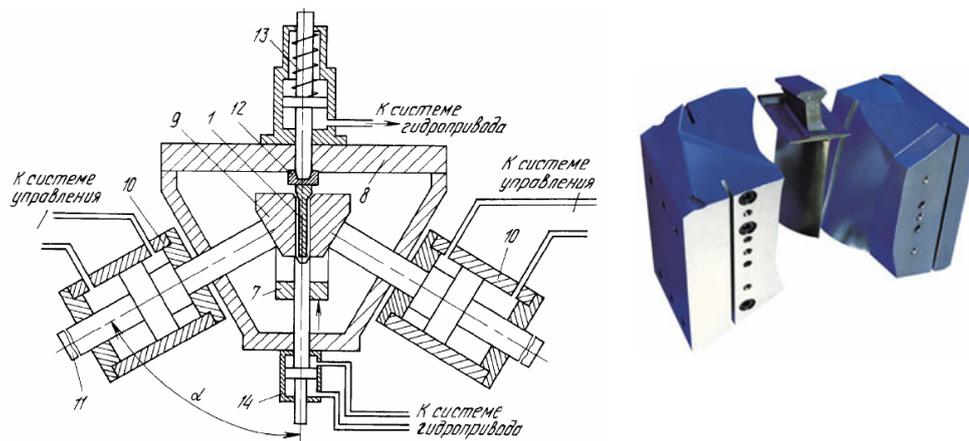


Рис. 3. Технологическая схема (слева) [18], лопатка и электроды-инструменты для круговой ЭХО (справа) [19]

На основе анализа известных технологических схем ЭХО проточной части моноколес предложена их следующая укрупненная классификация (рис. 5). Из нее видно, что имеется тенденция к переходу на технологические схемы с малой одновременно обрабатываемой площадью, так как они позволяют обрабатывать практически любые по площади поверхности при высоких плотностях тока и с использованием источников питания малой мощности. При этом для малоразмерных и относительно простой формы электродов-инструментов могут быть достигнуты наиболее эффективные условия электрохимического формообразования. В частности, это обусловлено лучшими условиями прокачки электролита, более достоверным контролем величины МЭЗ и условий ЭХО для всех участков обрабатываемой поверхности.

Теперь сформулируем основные направления развития технологии ЭХО лопаток:

- совершенствование круговой схемы ЭХО, позволяющей исключить ручную доработку кромок (особенно при $R < 1$ мм) и сопряжений;
- разработка новых схем многокоординатной ЭХО гибкими электродами (с управляемой формой рабочей поверхности) для опытно-экспериментального производства;
- разработка технологических схем ЭХО секционными ЭИ для обработки крупногабаритных лопаток вентиляторов и компрессоров;
- разработка новых технологических схем, источников питания и конструкций ЭИ, позволяющих получить высокие плотности тока (до 1000 А/см^2 и более), необходимые для получения низких параметров шероховатости (Ra 0,05 ... 0,1 мкм);

- повышение локализации процесса с целью снижения припусков и повышения точности обработки;
- специализация ЭХО для обработки новых материалов, в том числе ВТ8М, ВТ8М-1, ВТ18У и др.;
- повышение экологической чистоты процесса ЭХО.

В этой области начата работа и достигнуты значительные успехи в НИИД (г. Москва), казанской (КАИ, КГТУ), самарской (САИ) и уфимской (НИИ ПТиТ ЭХО при УГАТУ) школах электрохимической обработки и др.

4. МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ И ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

На рабочих поверхностях деталей ГТД взамен шероховатости, образующейся при традиционных методах механической обработки, находят все большее применение регулярные микрорельефы (РМР). Основные требования на микрогеометрию технических поверхностей регламентированы ГОСТ 24773-81 «Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики».

Как известно, микрогеометрия рабочих поверхностей играет главенствующую роль в поведении пар, так как их неровности первыми воспринимают воздействие контртел. РМР на обработанной поверхности создаются с одинаковыми по форме, размерам и взаиморасположению неровностями. Это дает возможность устанавливать оптимальный вид РМР и значения его высотных, шаговых и площадных параметров, обеспечивая требуемые эксплуатационные свойства: обтекаемость жидкостями и газами, износостойкость, условия трения и смазки, задиристость,

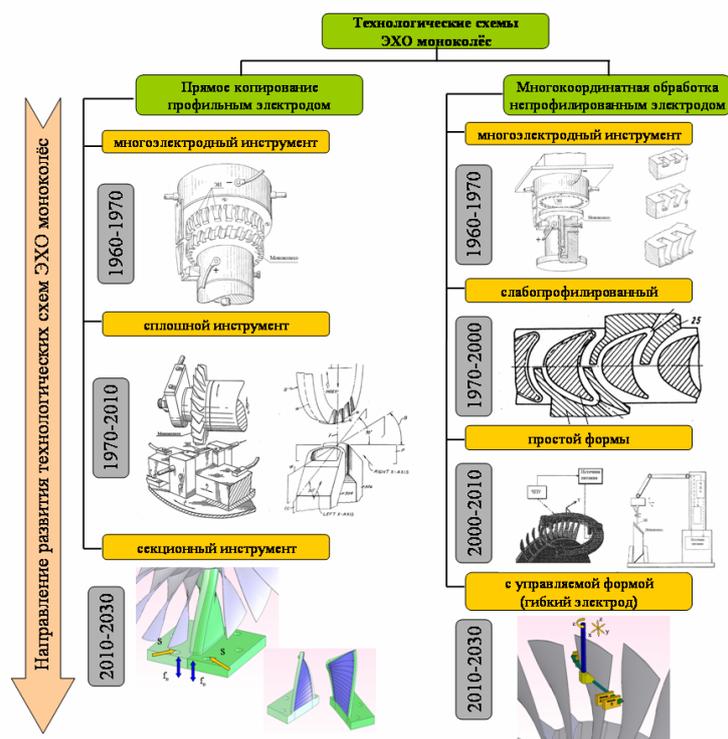


Рис. 5. Классификация технологических схем ЭХО проточной части моноколес [23–29]

гидроплотность, усталостную прочность и другие свойства.

При традиционной обработке РМР достигается тонким пластическим деформированием поверхностных слоев обрабатываемого материала шарами или алмазными наконечниками и усложнением кинематики за счет осцилляционного движения деформирующего элемента [30].

Известны и другие альтернативные способы формирования микрорельефа. Так, в США применено химическое протравливание через трафареты с закономерно расположенными отверстиями, в результате которого на поверхности образуются регулярные впадины в виде лунок. В ФРГ и Франции для образования регулярных микрорельефов поверхностей использованы копировальные системы и специальное оборудование со сменными копирами или с кинематическим регулированием траектории перемещения инструмента. В Японии созданы способы шлифования, которые позволяют на специальных станках образовывать регулярно расположенные системы канавок на обрабатываемых поверхностях [31].

Все перечисленные методы имеют те или иные существенные недостатки. К ним относятся: высокая стоимость специального оборудования, требующего сложной индивидуальной настройки, необходимость использо-

вания специально изготавливаемых для каждой детали копиров, инструментов, управляющих программ; относительно узкие возможности в формировании различных по форме и расположению микрорельефов, низкая производительность обработки, высокая энерго- и материалоемкость, неэкологичность процесса (при травлении в электролитах на базе щелочей и кислот).

Указанных недостатков лишена ИЭХО, которую проводят в растворах нейтральных солей (например, NaNO_3).

Импульсная ЭХО позволяет:

- аналитически рассчитывать и практически получать любые профили в продольном сечении;
- в достаточно широких пределах регулировать продольную форму элементов микрорельефа (за счет управления параметрами режима);
- создавать переменный микрорельеф (с разной формой элементов и их расположением) на одной поверхности;
- формировать элементы микрорельефа на значительной по площади поверхности со скоростью 0,01 . . . 0,05 мм/мин (по высоте);
- формировать микрорельефы на сложно-фасонных поверхностях;

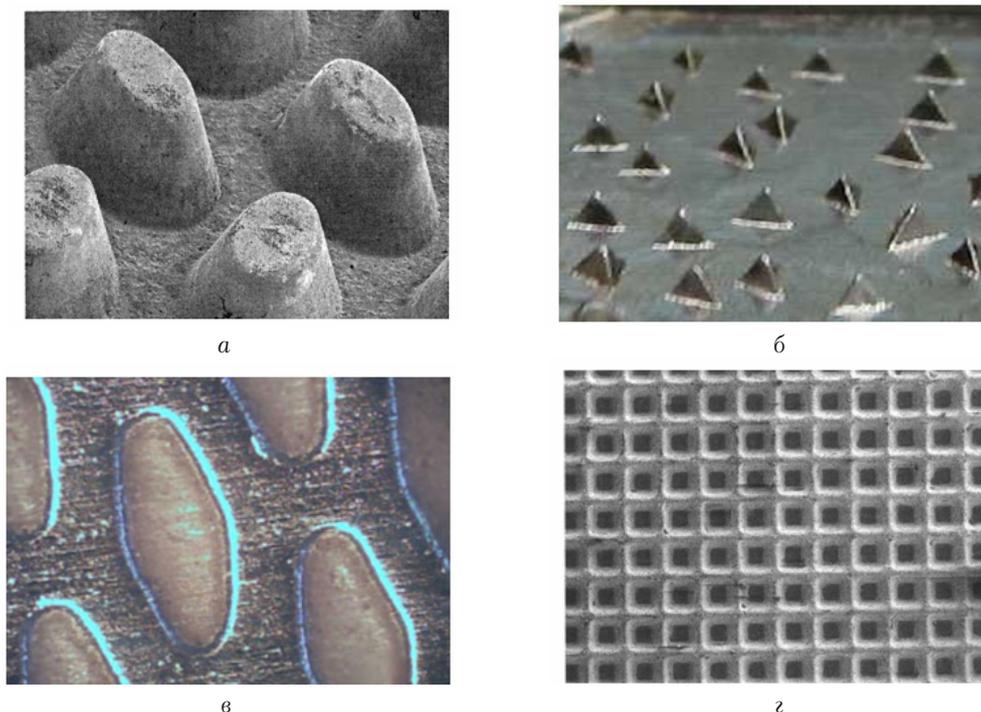


Рис. 6. Образцы с микрорельефом, полученным методом ИЭХО (*а* — конические элементы, расположенные в шахматном порядке; *б* — пирамидальные хаотично расположенные элементы; *в* — эллипсоидальные направленно-ориентированные элементы; *г* — текстура квадратных элементов)

- получать элементы микрорельефа с характерным размером в поперечном сечении — 20 . . . 500 мкм.

Также необходимо отметить, что одним из важных направлений совершенствования профиля пера лопаток является использование поверхностного микрорельефа, который позволяет:

- повысить обтекаемости газами за счет использования «Лотус»-эффекта;
- повысить обтекаемость за счет учета скоростей местных потоков в отдельных точках проточной части лопатки (путем использования переменного микрорельефа);
- повысить коэффициент теплопередачи от газового потока к лопатке;
- обеспечить оптимальное распределение воздуха по поверхности лопатки и однородное поле температуры.

Несмотря на все преимущества, микрорельеф на поверхности пера лопаток до недавнего времени практически не использовался, что обусловлено сложностью и недостатками (пластическое деформирование поверхности, наличие растягивающих напряжений) существующих технологий. Преимущества ИЭХО и ее новые технологические возможности могут дать мощный импульс в области профилирования проточной части лопаток.

Достигнутый уровень ИЭХО в области микропрофилирования позволяет по-новому подойти к классификации микрорельефов. Так, например, можно предложить новую классификацию, основанную на различии микрорельефов по форме элементов, по их ориентации, по периодичности расположения, по степени заполнения поверхности (рис. 6).

Из сказанного можно отметить, что технологические возможности метода ИЭХО в области микроструктурирования и текстурирования намного превосходят имеющиеся стандарты, что создает все предпосылки для их пересмотра и расширения.

В итоге можно сделать вывод, что повышение надежности и ресурса деталей ГТД, расширение выполняемых ими функций путем регуляризации микрогеометрии и текстурирования их технических поверхностей является актуальным и приоритетным для российской и мировой науки и техники направлением.

5. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ

Одним из приоритетных направлений в авиадвигателестроении является разработка и применение новых видов аэродинамических уплотнений — щеточных и лабиринтных

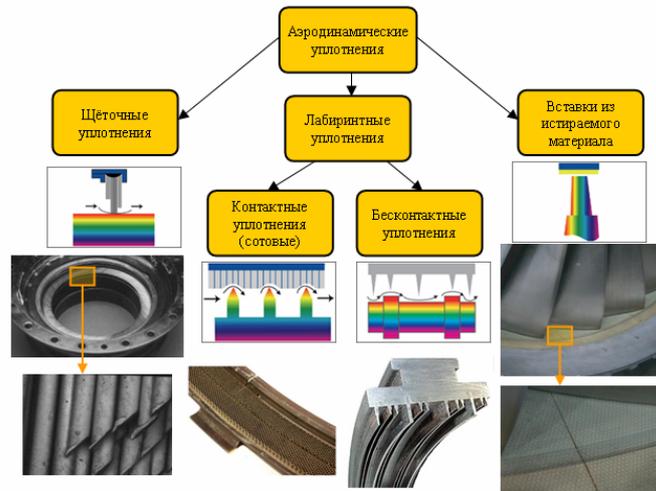


Рис. 7. Классификация аэродинамических уплотнений

(рис. 7), позволяющих снизить утечки газа и соответственно повысить КПД двигателя.

Известно, что широкое применение щеточных уплотнений сдерживается лишь сложностью автоматизации и организации их изготовления в условиях серийного производства [32]. Также следует отметить, что традиционные технологии изготовления и взаимной ориентации (намотка, навивка, укладка), соединения (сварка, пайка, завальцовка, чеканка) элементов уплотнения и обработки их контактных поверхностей (шлифование, электроэрозия) сложны в реализации, малопроизводительны, либо не обеспечивают достаточной эксплуатационной надежности, вследствие возникновения напряженных слоев, вызывающих значительную деформацию, дефектов структуры материала и поверхности и пр. Таким образом, имеющиеся технологические проблемы ограничивают конструкторский замысел, что сдерживает развитие конструкции аэродинамических уплотнительных устройств. Особые проблемы возникают в случае усложнения формы продольного и поперечного профиля выступов, например, из соображений придания особых изгибных и уплотняющих свойств, а также при использовании новых видов сталей и сплавов, труднообрабатываемых традиционными механическими методами.

Основные технические требования к элементам современных уплотнений следующие:

- шероховатость поверхности Ra 0,2...0,8 мкм;
- отсутствие заусенцев, острых кромок, растягивающих поверхностных напряжений;
- характерный размер в продольном сечении — 5 ... 15 мм;

- характерный размер в поперечном сечении — 50 ... 200 мкм;
- различные формы поперечного сечения (окружность, эллипс и др.);
- различные формы продольного сечения;
- расположение выступов под углом (до 60°) к оси уплотнения как в радиальной, так и в осевой плоскости.

Идея получения элементов аэродинамических уплотнений методом ИЭХО была предложена и апробирована специалистами НИИ ПТиТ ЭХО. Технологическая схема получения таких элементов при помощи электрода-инструмента в виде сетки с отверстиями уже описывалась ранее [14]. Развитие этой идеи совместно с техническими специалистами ОАО «УМПО» позволило создать опытные образцы перспективных уплотнений (рис. 8, 9) и разработать специальное оборудование.

В отличие от традиционных методов изготовления уплотнений ИЭХО позволяет:

- получать профили практически любой сложности в поперечном сечении при простом однокоординатном перемещении электрода-инструмента в направлении к детали;
- получить заданную форму продольного профиля выступа за счет программного управления боковым зазором;
- получать выступы практически любой высоты;
- исключить многоэтапный процесс изготовления элементов уплотнений заменой на одну операцию ИЭХО;
- формировать элементы уплотнений непосредственно в корпусе кольца, сегмента или вставки, на торце лопаток.

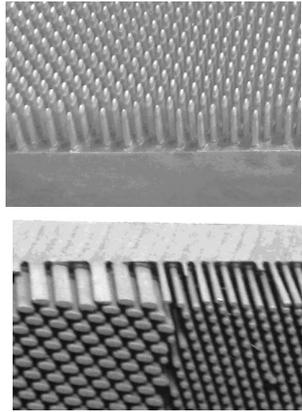


Рис. 8. Образцы перспективных аэродинамических уплотнений

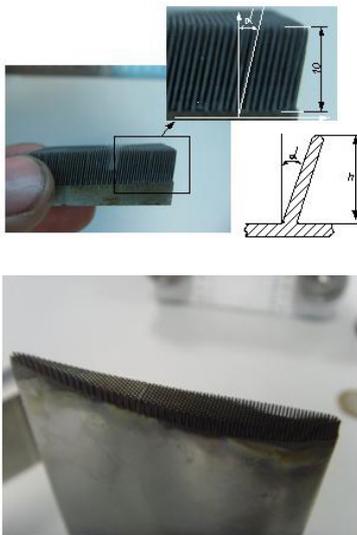


Рис. 9. Образцы перспективных аэродинамических уплотнений

6. ОБРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Повышение требований к применяемым материалам по жаростойкости, жаропрочности, удельной прочности заставляет создавать новые материалы с повышенными физико-механическими свойствами.

В конструкциях современных газотурбинных двигателей находят широкое применение титановые и жаропрочные сплавы на основе никеля и хрома, коэффициент обрабатываемости которых составляет 0,08 ... 0,6 (относительно стали 12X18H9T) [33] (рис. 10).

В новых конструкциях ГТД существенно возрастет доля композиционных и интерметаллидных материалов (рис. 11) [34], обрабатываемость которых еще ниже. В результате это приведет к существенному повышению трудоемкости и, как следствие, себестоимости всего двигателя.

Именно при обработке такого рода материалов следует ожидать наибольшего эффекта от применения ЭХО, так как выходные технологические показатели в этом случае определяются преимущественно электрохимическими и химическими свойствами и не зависят от прочности и твердости.

Полученные в последние годы научно-технические результаты по микроимпульсной биполярной ЭХО позволят с успехом обрабатывать композиционные материалы с существенно различными электрохимическими свойствами, что характерно для WC-Co, Ni-

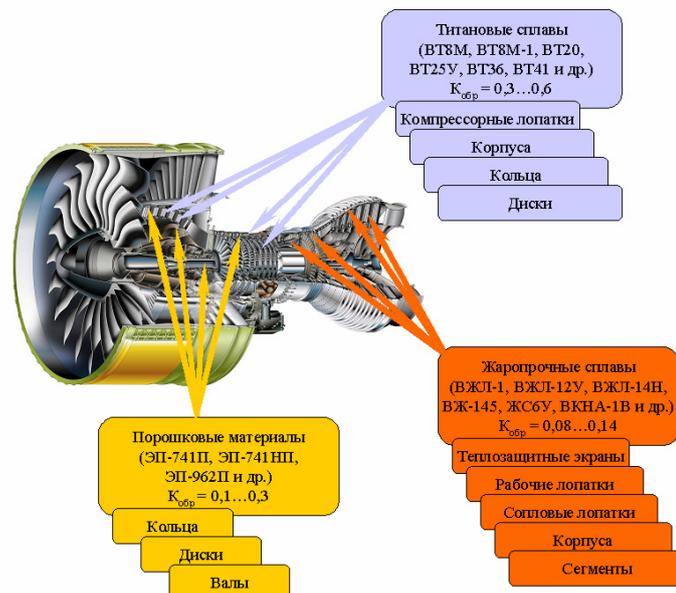


Рис. 10. Области применения труднообрабатываемых резанием материалов

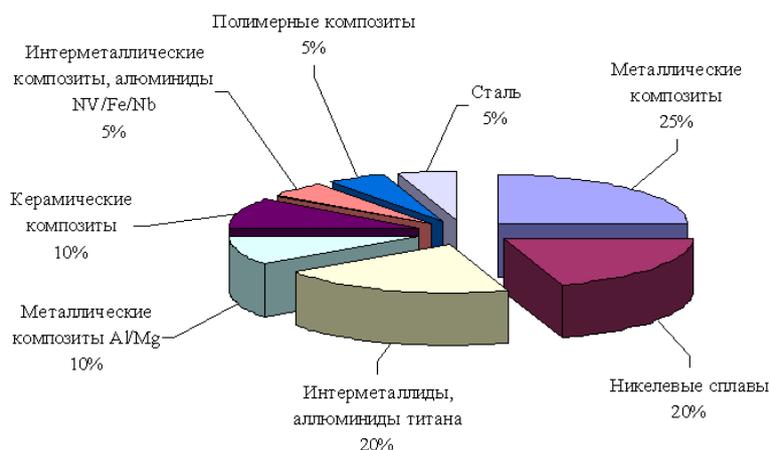


Рис. 11. Доля материалов в авиационном двигателестроении к 2020 г. [34]

Cr, Cu-Zn и ряда других распространенных групп материалов (рис. 12) [35].



Рис. 12. Образцы деталей из порошковых (а) и нанокристаллических (б) материалов

8. ВЫВОДЫ

1) На основе анализа конструктивного облика современного ГТД определены основные перспективные направления использования ИЭХО: прошивание прецизионных отверстий малого диаметра и сложной геометрической формы; обработка проточной части тонкостенных компрессорных лопаток и моноколес; микроструктурирование и текстурирование поверхностей деталей; формообразование элементов перспективных уплотнений; обработка деталей из труднообрабатываемых механическими методами материалов.

2) Приведены данные о достигнутом техническом уровне ИЭХО: технологических возможностях, точности, качестве поверх-

ностного слоя, производительности процесса в каждой конкретной области применения.

3) Перечислены основные направления совершенствования ИЭХО, в частности, указаны прогрессивные технологические схемы, позволяющие улучшить важнейшие выходные технологические показатели, повысить гибкость производства и расширить область применения ИЭХО в современном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Commercial High Bypass Turbofan Engines** [Электронный ресурс] (<http://www.aircraftenginedesign.com/cepics1.html>).
2. **Центральный институт авиационного моторостроения. Вентиляторы и компрессоры** [Электронный ресурс] (<http://www.ciam.ru/?SID=282&lang=RUS>).
3. **Центральный институт авиационного моторостроения. Турбины** [Электронный ресурс] (<http://www.ciam.ru/?SID=283&lang=RUS>).
4. **Compressor Rotor and Stator Blades** [Электронный ресурс] (http://www.turbocare.com/gas_turbine_compressor_blade.html).
5. **Gas Turbine Brush Seal** [Электронный ресурс] (http://www.turbocare.com/gas_turbine_brush_seals.html).
6. **Уралтурбо** [Электронный ресурс] (<http://uralturbo.ru/>).
7. **Department of Mechanical Engineering – Texas A&M University** [Электронный ресурс] (<http://www.mengr.tamu.edu/thtl/projects.html>).
8. **Примеры деталей, изготовленных методом ЭХО** [Электронный ресурс] (<http://www.pccm.ru/detali.html>).
9. **Jain, V. K.** Experimental and analytical study of contoured holes by shaped tube electrochem-

- ical drilling process / V. K. Jain, A. Chavan, A. Kulkarni // Proc. of the 15th Intern. symposium on electromachining. 2007. P. 315–318.
10. **Елисеев, Ю. С.** Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей : учеб. пособие / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, А. А. Митрофанов [и др.] М. : Дрофа, 2002. 656 с.
 11. **Алтынбаев, А. К.** Электроэрозионные методы обработки глубоких прецизионных отверстий в деталях авиационных двигателей / А. К. Алтынбаев, В. А. Гейкин // Металлообработка. 2003. № 6(18). С. 47–49.
 12. **Ishida, T.** Creation of curved holes of 5mm in diameter by means of electrical discharge machining / T. Ishida, T. Nakajima, M. Kita // Proc. of the 15th Intern. symposium on electromachining. 2007. P. 51–56.
 13. **Qu, N. S.** Micro-electrochemical machining of micro array holes / N. S. Qu, L. Wang, D. Zhu // Proc. of the 15th Intern. symposium on electromachining. 2007. P. 315–318.
 14. **Зайцев, А. Н.** Прецизионная электрохимическая обработка импульсным током / А. Н. Зайцев [и др.]. Уфа : Гилем, 2003. 196 с.
 15. **Зайцев, А. Н.** Высокоскоростное анодное растворение в условиях нестационарности электродных потенциалов / А. Н. Зайцев [и др.]. Уфа : Гилем, 2005. 220 с.
 16. **Елисеев, Ю.** Изготовление лопаток компрессора холодной пластической деформацией / Ю. Елисеев, В. Крымов, В. Поклак // Газотурбинные технологии. 2003. № 3. С. 32–35.
 17. **Ерочкин, М.** Объемная электрохимическая обработка на ОАО «Рыбинские моторы» / М. Ерочкин, Л. Уваров, А. Горшков // Газотурбинные технологии. 2003. № 3. С. 6–9.
 18. **Ерочкин, М. П.** Патент РФ 2058863, В23Н 9/10, публ. 1996. Способ круговой электрохимической обработки лопаток ГТД / М. П. Ерочкин [и др.].
 19. **ECM-Forming** [Электронный ресурс] (<http://winbrogroup.com/ecm-forming.htm>).
 20. **Steffens, K.** Feinbearbeitungsverfahren Schlüsseltechnologien fuer moderne Luftfahrverdichter / K. Steffens, A., F. Buckl. MTU Aero-Engines GmbH, Munchen, 2005.
 21. **ОСТ 1 02571-86.** Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера.
 22. **Елисеев, Ю. С.** Технология производства авиационных газотурбинных двигателей : учеб. пособие для вузов / Ю. С. Елисеев, А. Г. Бойцов, В. В. Крымов [и др.]. М. : Машиностроение, 2003. 512 с.
 23. **Wei, B.** Patent US 6787728, publ. 2004. Method and apparatus for near net shape rapid rough electromachining for blisks / B. Wei [et al].
 24. **Wei, B.** Patent US 6858125, publ. 2005. Multi-axis numerical control electro-machining of bladed disks / B. Wei [et al].
 25. **Burns, N. A.** Patent US 4851090, publ. 1989. Method and apparatus for electrochemically machining bladed disks / N. A. Burns [et al].
 26. **Lamphere, M. S.** Patent US 7204926, publ. 2007. Tandem blisk electrochemical machining / M. S. Lamphere [et al].
 27. **Trager, K.** Patent US 3288699, publ. 1966. Apparatus for electrochemical shaping / K. Trager [et al].
 28. **Hinman, E.** Patent US 4686020, publ. 1987. Method of electrochemical machining bladed rotors / E. Hinman.
 29. **Дмитриченко, В. И.** А.с. СССР 1164015, публ. 1985. Станок для электрообработки / В. И. Дмитриченко [и др.].
 30. **Шнейдер, Ю. Г.** Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. СПб. : СПб ГИТМО (ТУ). 2001. 264 с.
 31. **Регуляризация** рабочих поверхностей деталей приборов [Электронный ресурс] (<http://tps.ifmo.ru/graph.php?rzd=k&fl=kscw/rmpd>).
 32. **Зрелов, В. В.** Технология сеточных уплотнений / В. В. Зрелов, К. П. Крашенинников // Совершенствование технологии изготовления деталей в авиастроении. Самара, 1996. С. 65–74.
 33. **Баранчиков, В. И.** Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов : справ. / В. И. Баранчиков, А. В. Жаринов, Н. Д. Юдина [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 400 с.
 34. **Маслов, А. Р.** Высокие технологии в машиностроении / А. Р. Маслов // ИТО новости. Приложение к журналу «Комплект: инструмент, технология, оборудование». 2007. № 11. С. 8–11.
 35. **Zaytsev, A. N.** Precise pulse electrochemical machining by bipolar current (Aspects of effective technological application) / A. N. Zaytsev [et al] // Proc. of the 14th Intern. symposium for Electromachining ISEM XIV. Scotland, 2004.

ОБ АВТОРЕ



Павлинич Сергей Петрович, техн. дир. ОАО УМПО. Канд. техн. наук. Засл. машиностроитель Республики Башкортостан. Лауреат Гос. премии Республики Башкортостан в обл. науки и техники.