

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.30987/article_5c486cc29f30d9.02610717

В.А. Полетаев, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», 152394, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53)

А.А. Орлов, к.т.н.

(ПАО «ОДК-Сатурн», 152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр. Ленина, 163)

E-mail: poletaev@rsatu.ru

Выбор стратегий электроэрозионной обработки перфорационных отверстий в турбинных лопатках ГТД

В статье рассмотрены различные варианты технологических процессов изготовления перфорационных отверстий лопаток турбин. Сопоставлены технологические процессы электроэрозионной обработки, основанные на последовательной и одновременной прошивке отверстий в проточной части лопаток турбин, определены рациональные области их применения.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка; прошивка (прожиг) перфорационных отверстий; лопатки турбин; электроэрозионные станки; мультэлектроды.

V.A. Poletaev, Dr. Sc. Tech.

(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk", 53, Pushkin Str., Rybinsk, 152394),

A.A. Orlov, Can. Sc. Tech.

(PPC "ODK-Saturn", 16, Lenin Avenue, Rybinsk, Yaroslavl region, 152903)

Strategy choice for punch electro-erosion treatment in turbine blades of gas turbine engines

In the paper different versions of engineering procedures for manufacturing punches in turbine blades are considered. The engineering procedures of electro-erosion treatment based on consecutive and simultaneous punch broaching in a flowing part of turbine blades are compared, and the efficient fields of their used are defined.

Keywords: electro-erosion treatment; punch broaching (burning-through); turbine blades; electro-erosion machines; multi-electrodes.

Основными узлами газотурбинных двигателей (ГТД) являются лопаточные колёса турбин и компрессоров, образующих ротор и статор двигателя. Технологические характеристики ГТД (экономичность, КПД и т.д.), в первую очередь, зависят от качества изготовления лопаточного колеса, как в целом, так и каждой лопатки в отдельности.

При этом трудоемкость изготовления лопаток достигает 45...50 % от общей трудоемкости изготовления всех деталей ГТД. Более то-

го, развитие авиационных газотурбинных двигателей идет по пути постоянного повышения рабочих температур, что требует использования новых материалов и проектирования деталей с эффективным охлаждением.

Использование в ГТД лопаток турбин, охлаждаемых через внутренние полости, требует изготовления на проточной части лопаток значительного количества сквозных отверстий малого диаметра 0,5...0,7 мм. Отверстия располагаются в несколько рядов на проточной

части лопаток турбин от хвостовика к периферии. В зависимости от размеров проточной части лопаток, их количество может составлять несколько десятков (сотен) отверстий расположенных в два и более ряда, от края входной кромки в сторону выходной по спинке и корыту проточной части лопатки [1].

Применение жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов при изготовлении лопаток турбин существенно ограничивает изготовление данных отверстий с помощью различных методов механической обработки. В настоящий момент определяющим способом изготовления таких отверстий является электроэрозионная обработка (ЭЭО) – прошивка отверстий [2].

Электроэрозионная обработка, используя в своей основе единый электрофизический процесс, реализуется при различных технологических схемах обработки. Для реализации каждой схемы существует специальное технологическое оборудование. Причем на каждом предприятии авиационного и энергетического машиностроения существует весь набор технологических машин, способных реализовать ту или иную схему обработки, каждая из которых приводит к достижению требуемого результата.

В связи с этим перед разработчиком технологического процесса постоянно возникает проблема выбора стратегии (технологической схемы) ЭЭО перфорационных отверстий в лопатках турбин. При этом технолог, как правило, располагает следующим набором технологического оборудования, которое в целом можно разделить на три группы:

1. Копировально-прошивочные электроэрозионные станки, например, Mitsubishi мод. EA28, CHMER мод. CM434, Agie Form 20/30, станки советского производства мод. 4E723, 4B723 и т.д. Данное оборудование осуществляет ЭЭО отверстий (прошивку) при вертикальном перемещении суппорта, несущего инструмент, который может быть сложной формы, в том числе профильный. Рациональной областью применения данного типа станков является обработка профильных карманов, канавок, занижений, литников, глухих отверстий, штамповой оснастки. При этом эффективность использования данных станков для обработки перфорационных отверстий считается недостаточной из-за невысокой производительности.

2. Электроэрозионные сверлильные станки (супердрели), например, Sarix мод. SX-200, MACHLine, Agie мод. DRILL 300 и т.д. Дан-

ное оборудование осуществляет ЭЭО при вертикальном перемещении суппорта (шпинделя) с вращающимся электродом. Электрод, как правило, полый, вращается вокруг своей оси и перемещается в координатах X , Y , Z , что позволяет осуществлять планетарное движение вокруг оси формируемого отверстия. Основная область использования – выполнение операций по обработке различных перфорационных отверстий. Современные станки позволяют обрабатывать отверстия диаметром от 0,1 до 6,0 мм [3].

3. Электроэрозионные проволочно-вырезные станки, например, Agie мод. CUT 30, Mitsubishi мод. MV2400S, ONA мод. AV130, АРТА мод. 453ПРО и т.д. осуществляют обработку (вырезку, раскрой) деталей с помощью бесконечного проволочного электрода путем его перемещения по осям X , Y , Z . Данное оборудование предназначено для вырезки различных профильных элементов наружного и внутреннего контура детали и может использоваться как для выполнения предварительных, так и окончательных операций. Например, отрезки технологических прибылей; разрезки собранных узлов; вырезки уступов для фиксации блоков сопловых аппаратов; профилирования сотовых уплотнений и т.д.

Предварительный, качественный анализ возможностей данного оборудования показывает, что для выполнения перфорационных отверстий наиболее предпочтительным, с точки зрения затрат на подготовку производства, является выбор в пользу электроэрозионных станков типа «супердрель». Здесь затраты на подготовку технологической операции и сроки изготовления опытного образца минимальны.

Однако поочередная обработка отверстий в условиях ужесточения требований к величине преобразованного слоя и шероховатости поверхности существенно увеличивает технологический цикл изготовления деталей, а также приводит к увеличению себестоимости изготовления. К тому же использование данного типа оборудования при серийном производстве лопаток турбины требует наличия дополнительных функций (например, замера и припасовки детали, орбитальной разбивки), что также приводит к существенному увеличению затрат.

С этой точки зрения, электроэрозионные копировально-прошивочные станки более эффективны в силу ограниченности своих технологических возможностей. Они более просты, не имеют большого количества управ-

ляемых координат, но обладают возможностью осуществления обработки с помощью профильных электродов гребенчатого типа или мультиэлектродов.

Данное преимущество позволяет вести обработку нескольких отверстий. При этом мультиэлектродов может быть установлено на вертикальном суппорте или шпинделе станка несколько, что позволяет вести обработку одновременно нескольких деталей. Естественно, затраты на изготовление такого инструмента и оснастку не сопоставимы с затратами на очередную обработку (прошивку) отверстий одним электродом. В связи с этим, для принятия решения о стратегии осуществления ЭЭО отверстий в лопатках ГТД необходим анализ затрат на осуществление той или иной технологической схемы, оценка себестоимости изготовления детали по сравниваемым вариантам.

На ОДК «Сатурн» был проведен такой анализ. При этом сравнивались различные схемы ЭЭО при прошивке отверстий в лопатках турбин диаметром от 0,5 до 0,7 мм; на глубину 4,0...5,0 мм. Отверстия расположены на входной кромке лопаток турбин, изготовленных из сплава ЖС6К; количество изготовленных отверстий 20 шт. в одном ряду; количество рядов от 3 до 5. Шероховатость поверхности внутри отверстий $Ra = 3,2$ мкм, преобразованный слой не более 0,1 мм.

Анализировался следующий алгоритм подготовки производства ЭЭО отверстий (рис. 1).

Для реализации обеих технологических схем прошивки отверстий при подготовке производства требуется:

1. Рабочие приспособления. Здесь возможны два варианта:

- использование специализированных наклонно-поворотных (глобусных) столов, имеющих две управляемые оси перемещения деталей;

- использование специальных приспособлений в виде угловых подставок (угольников).

Оба типа оснастки имеют базовые поверхности, позволяющие совместить приспособления с системой координат станка (нулевой точкой).

2. Инструментальная оснастка. Здесь для станков, осуществляющих прошивку отверстий, используют универсальные конструкции державок в виде цанг и направляющих (аналог конструктивных втулок). Для одновременной обработки отверстий используют специальные державки для крепления мультиэлектродов. Конструкция державки определяется количеством прожигаемых отверстий.

3. Электроды-инструменты. Для станков, реализующих поочередную прошивку по одному отверстию, инструмент выполняют в виде полой трубки, обычно из латуни. Для многоступенчатой обработки – это набор цилиндрических электродов, собираемых на державке в единый комплект (гребенку). Количество трубок соответствует количеству прошиваемых отверстий.

4. Управляющие программы перемещений инструмента при прожиге отверстий, карты наладки многоинструментальной оснастки, операционные и контрольные карты, средства контроля.

Анализ необходимого объема технологической подготовки производства показывает, что в случае наличия наклонно-поворотного стола затраты на оснастку, а также разработку управляющих программ и карт наладок для обоих типов станков будут примерно одинаковыми. При этом следует учитывать, что обработку деталей с большим количеством перфорационных отверстий, расположенных под разными углами, целесообразно выполнять на станках с наклонно-поворотным столом.

Обработка лопаток с несколькими рядами отверстий, распределенными по всей поверхности проточной части, в случае отсутствия специализированного наклонно-поворотного стола требует изготовления нескольких комплектов оснастки. Причем число комплектов будет равно количеству рядов отверстий. При этом затраты на технологическую подготовку производства вырастут многократно, а стоимость оснастки может сравниться по стоимости с оснащением станка наклонно-поворотным столом.

В случае равенства затрат на техническую оснастку разница в подготовке рассматриваемых вариантов прожига отверстий сводится к определению расхода электродов на каждом типе оборудования. Необходимое количество электродов установлено авторами на основе собственного опыта по прошивке перфорационных отверстий в лопатках турбин и анализе ЭЭО отверстий, изложенных в исследованиях [3]. Это количество может быть рассчитано на основе следующего выражения:

$$N = \frac{n_{\text{отв}} n_{\text{дет}} \times h \times \left(\frac{i}{100} \times n_{\text{пр}} + k_{\text{п}} \right)}{\left(L_{\text{о}} - L_{\text{ц}} - L_{\text{н}} - L_{\text{хх}} \right)}, \quad (1)$$

где N – требуемое количество электродов; $n_{\text{отв}}$ – количество обрабатываемых отверстий;

$n_{ДЕТ}$ – количество обрабатываемых деталей;
 $n_{ПР}$ – количество отверстий, обработанных одним электродом; h – глубина обработки, мм;
 i – значение износа электрода, %; $k_{П}$ – коэффициент подторцовки (подрезки) рабочей час-

ти электрода; L_0 – длина прожигаемого отверстия, мм; $L_{Ц}$ – длина цанги для зажима электрода, мм; $L_{Н}$ – длина направляющей электрода, мм; L_{xx} – расстояние от направляющей до поверхности детали, мм.

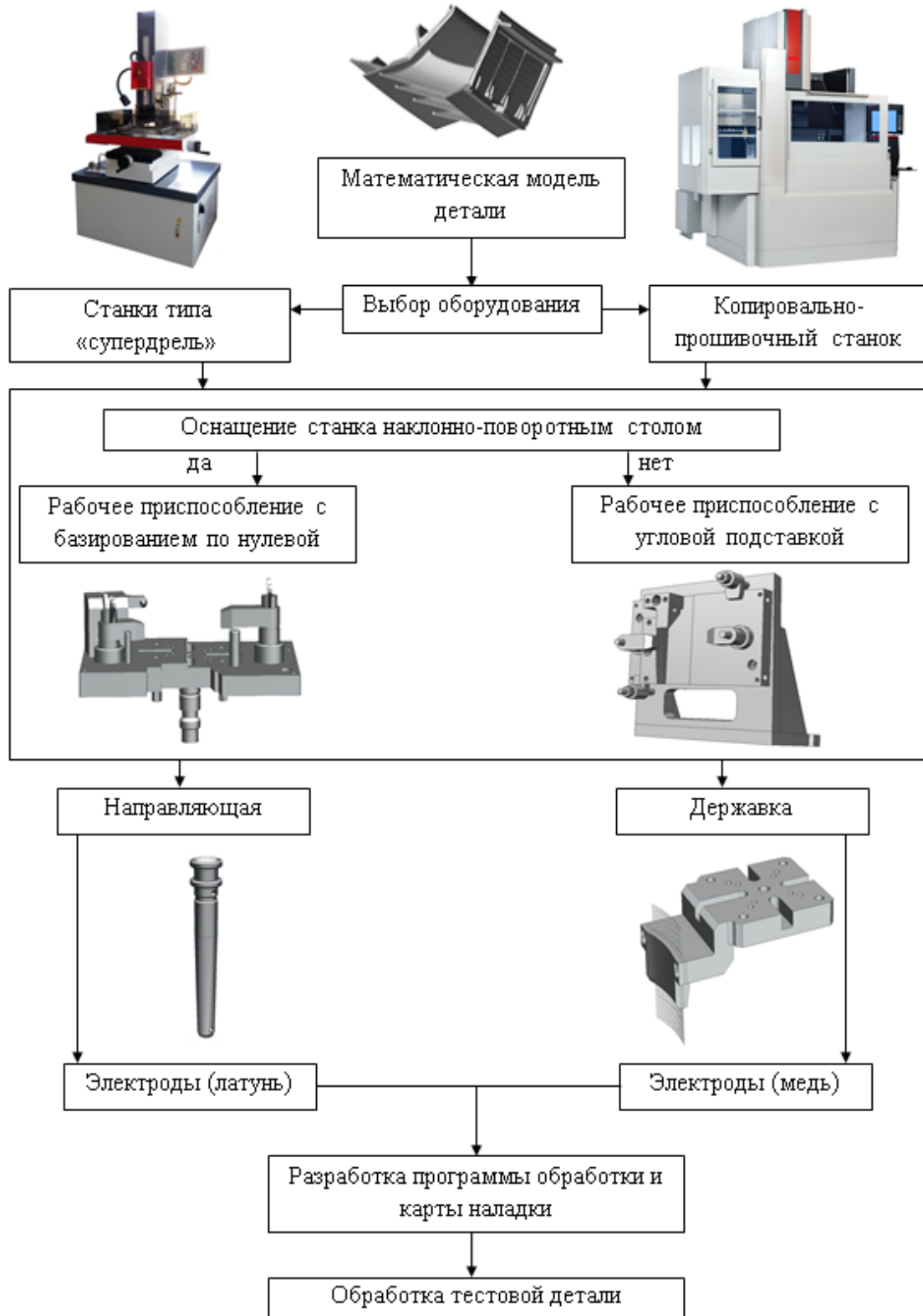


Рис. 1. Алгоритм технологической подготовки производства для электроэрозионных станков при обработке перфорационных отверстий

Использование данного выражения (1) позволяет проводить достоверные расчеты количества требующихся электродов. Так, при очередной прошивке лопаток из четырех рядов отверстий количеством по 20 шт. в каждом, диаметром 0,5 мм на длину 5 мм требуется электрод длиной 400 мм. Однако некоторые модели электроэрозионных сверлильных станков, например, Winbro мод. HSD6, Elenix мод. CT1200FX, позволяют устанавливать электрод длиной до 600...700 мм. Поэтому при наличии возможности надо стремиться к установке электродов максимальной длины, так как в этом случае общая длина электрода, с учетом его части используемой для закрепления в цанге, по отношению к его рабочей длине будет минимальна.

На копировально-прошивочных станках целесообразно использовать медные или вольфрамовые электроды. При этом их износ существенно ниже латунных. Используя выражение (1) можно определить количество отверстий, выполненных одним электродом. Так, медным электродом с рабочей длиной 80 мм можно будет выполнить 15...18 отверстий, а вольфрамовым – 25...30 отверстий.

Время обработки отверстий с учетом получения указанных выше требований на «супердрели» составит приблизительно 2,0...2,5 мин на одно отверстие и 40...50 мин на ряд в целом. При этом время обработки ряда отверстий на копировально-прошивочном станке будет сравнимо с «супердрелью» и составит примерно 50...60 мин на ряд или 2,5...3,0 мин на одно отверстие.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что вариант применения копировально-прошивочных станков для обработки перфорационных отверстий наиболее целесообразен в условиях серийного производства.

Оптимальным является использование данного варианта прошивки при изготовлении одного-двух рядов отверстий с помощью вольфрамовых электродов.

Использование станков типа «супердрель» целесообразно при обработке лопаток с большим числом перфорационных отверстий от 3 рядов до 15 и более. В данном случае для получения максимального эффекта станки должны быть оснащены наклонно-поворотными столами, сменщиками инструмента или электродов, а также системами автоматического замера и последующей припасовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Физико-химические** методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Изд. Дрофа, 2002. – 656 с.
2. **Поletaев В.А.** Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
3. **Смоленцев В.П.** «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – М.: Высшая школа, 1983. – 247 с.

REFERENCES

1. *Physical-Chemical Methods of Processing in Gas Turbine Engine Manufacturing* / under the B.P. Saushkin. – M.: Drofa Publishing House, 2002, - pp. 656.
2. *Poletaev V.A. Technology of Blade Automated Manufacturing for Gas Turbine Engines.* – M.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 256.
3. *Smolentsev V.P. "Electro-Physical and Electro-Chemical Methods for Material Treatment.* – M.: Higher School, 1983. – pp. 247.

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев

