



# ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

## ЧАСТЬ 1. СЛОЖНОКОНТУРНАЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

**This article examines trends in the development of technologies and equipment for electrical-discharge machining. The examples show interesting technological and design solutions which allow to provide implementation of escalating requirements of the consumer.**

Технологии электроэрозионной обработки материалов обладают всеми признаками ключевых технологий [1, 2]. За относительно короткий срок (около 60 лет) производство электроэрозионных станков по объему продаж заняло четвертое место на рынке металлообрабатывающего оборудования. Развиваясь синхронно с производством оборудования других типов, оно в то же время стало площадкой для внедрения ряда нововведений – обработки нанообъектов, применения линейных приводов и специальных конструкционных керамик [3].

Наибольшее распространение на предприятиях машино- и приборостроения получили следующие технологии электроэрозионной обработки:

- обработка сложноконтурных поверхностей и отверстий (операция электроэрозионная копировально-прошивочная);
- обработка сложноконтурных линейчатых поверхностей (операция электроэрозионная профильно-вырезная);
- прошивка глубоких отверстий малого диаметра (операция электроэрозионная прошивочная).

**Электроэрозионная обработка сложноконтурных полостей и отверстий осуществляется на копировально-прошивочных станках.**

Станки японских компаний Makino и Mitsubishi обладают широкими технологическими возможностями. Они снабжены целым рядом проектно-технологических функций. Так, на станках S-серии компании Makino используется система HQSF для ЭЭО с параметром шероховатости поверхности  $Ra = 0,2$  мкм (зеркальная обработка). Имеется функция Super Edge для получения радиусов 0,01 мм при обработке точных углов. Станки фирмы Mitsubishi компонуются по схеме «неподвижный стол – подвижная головка», использованы линейные направляющие качения. Станки оснащены системой адаптивного управления процессом, системой быстрой прошивки узких глубоких полостей.

Копировально-прошивочные станки фирмы Sodick оснащены КЧПУ генераторами серии LN/LQ с максимальным током 40, 80, 160, 240 А. Базовый генератор обеспечивает максимальную производительность до 600 мм<sup>3</sup>/мин при обработке стали графитовым ЭИ. Имеется функция чистовой обработки (зеркальное выхаживание,  $Ra = 0,06$  мкм) без замены диэлектрика или в специальном диэлектрике. Функция Píkagen pulse обеспечивает пониженный износ электродов-инструментов (ЭИ), функция MAP11 – оптимизацию параметров режима по мере изменения геометрии межэлектродного промежутка. Используется объектно-ориентированная 3D CAD-CAM система сквозного проектирования. Линейные двигатели привода осей и высокоточные датчики линейного положения обеспечивают по данным компании точность позиционирования  $\pm 0,01$  мкм. Достижимая точность обработки по стандартной технологии фирмы составляет от  $\pm 1,5$  до  $\pm 5$  мкм на 300 мм длины в зависимости от модели станка. В качестве опции поставляется ось C углового позиционирования со шпинделем вращения. Предусмотрена обработка с орбитальными осцилляциями ЭИ (5 базовых траекторий и 72 производных). В зависимости от модели станка линейные перемещения по осям осуществляются за счет перемещения стола или головки.

Европейские производители электроэрозионных копировально-прошивочных станков представлены фирмами AGIE, Charmille (Швейцария), ONA (Испания), Winbro Group (Великобритания), Zimmer + Krein GmbH & Co (Германия).

Фирма ONA предлагает широкую гамму станков, которые отличаются современным дизайном и высокими технологическими характеристиками. Станки оснащены системой КЧПУ ONA, осью C с углом поворота 360°. Максимальный ток генератора импульсов 60 А (опция 120 А). Используются современные системы очистки рабочей жидкости без применения сменных картриджей, обеспечивающие отделение твердых частиц размерами до 3 мкм.

Гамма станков серии Genius фирмы Zimmer + Krein GmbH & Co. KG выгодно отличается компактностью конструкции и относительно малой потребной производственной площадью при достаточно высокой производительности и точности обработки. Разрешение по линейным осям  $\pm 1$  мкм, по оси C  $\pm 0,001^\circ$ . Все станки этой серии конструктивно выполнены с неподвижным столом, регулируемой по высоте ванной и встроенной осью C. Модульный принцип, заложенный в конструкцию станков, позволяет выбрать оптимальную конфигурацию. Жесткая литая конструкция станины в комбинации с направляющими качения с предварительным натягом обеспечивают высокие точностные параметры обработки.

Станки комплектуются устройством смены инструментов роторного типа на 16 или 24 позиции или линейным устройством Eagle магазинного типа на 50 позиций. Станки могут комплектоваться загрузочно-разгрузочным устройством «Chameleon», обеспечивающим любую комбинацию паллет с заготовками и электродами, поворотным устройством (пятая ось).



Станки серии Genius могут комплектоваться встраиваемым модулем, обеспечивающим финишную обработку с параметром Ra менее 0,8 мкм, специальным модулем для повышения производительности при обработке твердых сплавов. Предусмотрена опция в виде вращающейся головки и насосной установки высокого давления для прошивки глубоких отверстий диаметром 0,1...6 мм и полостей с помощью полых электродов (функция Superdrill).

Станки швейцарских компаний Agie и Charmille получили широкое распространение на российских предприятиях. Многие новые идеи и технические решения получили материальное воплощение в этих компаниях. Так, модель 2400QCR интегрирована с роботом, управляемым от ЧПУ и способным заменять 8 паллет и 76 инструментов. В большинстве станков используются генераторы импульсов типа ISOPULS, вырабатывающих «изоэнергетические» импульсы с блоком защиты от КЗ типа SPAC.

Разнообразное по назначению и технологическим возможностям электроэрозионное оборудование поставляют производители Тайваня. Так, станок EB600L (фирмы JSEDM) имеет C-ось, смонтированную внутри головки станка. Используя эту ось, можно изготавливать поверхности вращения, поверхности сложного профиля, выполнять различные операции с использованием вращающегося дискового или цилиндрического электродов. Генератор импульсов станков данного типа обеспечивает максимальный ток 60 или 90 А. Максимальная производительность 400/600 мм<sup>3</sup>/мин, наименьшая шероховатость Ra = 0,3 мкм.

В последние годы на рынке электроэрозионного оборудования появились китайские производители, станки которых, как правило, дешевле функциональных аналогов других компаний.

Конкурентоспособность современного станочного оборудования обеспечивается высоким уровнем автоматизации. Поэтому ведущие фирмы-производители оснащают станки автоматическими устройствами для смены заготовок и инструмента. Так, например, компактный агрегат, созданный компанией Sodick, обеспечивает смену 40 электродов и 8 паллет с заготовками и позволяет решить проблему непрерывной и долговременной работы станка в автоматическом режиме. Агрегат представляет собой автономную, компактную и интегрируемую конструкцию. Для расширения технологических возможностей

оборудования многие компании-производители предлагают в качестве опций дополнительные оси А и С. Ось А реализуется за счет применения поворотного устройства, устанавливаемого на штатном столе станка. Это позволяет решать технологические задачи, связанные с непрерывным или дискретным поворотом заготовки вокруг оси, перпендикулярной оси шпинделя. Ось С обеспечивает поворот инструмента относительно оси Z и реализуется с помощью специальной головки, закрепляемой на шпинделе станка.

**Обработка сложноконтурных линейчатых поверхностей осуществляется на проволочно-вырезных электроэрозионных станках.** К настоящему времени технологии и оборудование для электроэрозионной вырезки электродом проволокой (ЭП) получили широкое распространение, создан обширный рынок соответствующих станков. Для точного относительного перемещения стола и рабочего участка проволоки по заданному контуру используются современные приводы с ЧПУ или КЧПУ.

На этой операции удается получать поверхности, образованные не только поступательным перемещением рабочего участка проволоки, но и более сложные поверхности с использованием дополнительного пространственного вращения рабочего участка. Это достигается применением таких схем обработки, в которых верхняя и нижняя направляющие проволоки перемещаются независимо друг от друга по заданной программе. Отметим, что использование многокоординатных проволочно-вырезных станков позволяет существенно расширить возможности конструктора при проектировании новых технических объектов.

Разработаны различные технические решения, направленные на повышение жесткости рабочего участка проволоки. Так, предложен способ обработки, по которому одна из находящихся в плотном контакте проволока является рабочей, а вторая – поддерживающей, препятствующей изгибу рабочего участка ЭИ и его вибрации. Такая система позволила вдвое снизить прогиб рабочей проволоки.

Рабочими средами в технологиях электроэрозионной проволочной вырезки являются маловязкие диэлектрические жидкости: масло, керосин или вода (промышленная, дистиллированная или деионизированная). Заметим, что как водные, так и



углеводородные среды в качестве рабочих жидкостей для ЭЗО имеют свои преимущества и недостатки, что необходимо учитывать при выборе рабочей жидкости [2].

Практически все ведущие производители оборудования оснащают станки антиэлектролизными генераторами импульсов или соответствующими приставками. Это позволяет исключить окисление поверхности при обработке в воде за счет применения биполярных импульсов тока.

В качестве электрода-инструмента используется проволока, изготовленная по первому и второму классам точности, с максимальным отклонением диаметра от номинального не более 0,005 мм. Латунная проволока – наиболее подходящий инструмент для проволочной вырезки, так как ее прочность в зависимости от состава лежит в пределах 400...900 МПа, а относительное удлинение составляет от 3 до 30%. Ряд фирм специализируется на выпуске высококачественной проволоки для проволочно-вырезных станков (SEI, Primatex GmbH). Установлено, что применение покрытия с высоким содержанием цинка обеспечивает повышение производительности на 40...50% для заданной толщины реза или существенно повышает толщину реза при заданной производительности. Легирование латуни специальными компонентами приводит к заметному увеличению максимальных растягивающих напряжений.

Выбор параметров режима работы генератора импульсов зависит от требований к качеству поверхности детали, ее материала и толщины (высоты реза). На выбранном режиме не должно быть разрывов электрода-проволоки. Современные генераторы импульсов обеспечивают создание униполярных и биполярных импульсов различной энергии с частотой до сотен кГц. Созданы генераторы или приставки к ним для «зеркальной» обработки, обеспечивающие шероховатость поверхности до  $Ra = 0,04$  мкм и генераторы для высокопроизводительной резки (до 600 мм<sup>2</sup>/мин). Последние модели станков оснащаются КЧПУ-генераторами и обеспечивают работу в режиме «интеллектуального» управления процессом резания.

Современные проволочно-вырезные станки отличаются высоким уровнем автоматизации, надежностью, гибкостью и позволяют эффективно решать многие технологические задачи основного и инструментального производства. Выпускаются двух-, четырех- и пятикоординатные проволочно-вырезные станки. Их программное обеспечение содержит базу технологических данных и предполагает использование ряда специальных функций, созданных для достижения высокой точности обработки отдельных геометрических элементов детали (прямолинейность пазов, точность углов).

Проволочно-вырезные станки фирмы Sodick поставляются со встроенной объектно-ориентированной трехмерной системой CALS (3D CAD-CAM) и системой автоматизированного програм-

мирования с рядом функциональных подсистем. Процессорные системы обеспечивают управление по 4-5 координатам (X, Y, U, V, +Z) с максимальной скоростью сервоподач до 5 м/мин.

Станок EXL100L и его модификации названы компанией ультрапрецизионными и рекламируются как самые точные электроэрозионные проволочно-вырезные станки. В его конструкции использованы двойные линейные двигатели без сердечников, закрытые керамические направляющие аэродинамического типа, керамическая станочная конструкция на гранитной станине, высокоточный холодильник-термостат диэлектрика, нанометровые линейные датчики положения Heidenhain и специально разработанная система управления Sodick Motion Controller (SMC). Конструкция привода обеспечивает дискретность подач 10 нм по осям X, Y, U, V. Станок укомплектован системой автоматической заправки проволоки диаметром от 0,03 мм. Диэлектрическая среда – масло.

Станки AP200L и AP450L являются станками повышенной точности (прецизионными). Первый из них предназначен для обработки в масле или воде и оснащен одним баком (объем 420 л), а второй оснащен двумя баками – для масла и деионизированной воды объемом 550 л каждый. Дискретность подач приводов осей составляет 100 нм. Плита стола, опоры заготовки, кронштейны и детали механизма протяжки проволоки выполнены из новых видов керамики.

Станки серии AQ предназначены для резания в воде. Модели AQ325L, AQ535L, AQ550L обеспечивают как обработку в ванне, так и струйную обработку, станок модели AQ750L – погружного типа, AQ800LF – струйного типа. Последняя модель создана для обработки габаритных заготовок.

Станки, работающие на воде, имеют в своем составе антиэлектролизный генератор биполярных импульсов. Такой источник питания компании Sodick генерирует импульсы малой длительности на первых двух проходах и биполярные импульсы на 3 проходе.

Для расширения технологических возможностей оборудования в некоторых моделях станков предусмотрены добавочные координаты. Так, наряду с 5 координатами, рассмотренными выше, предусмотрен поворот стола (ось W). Кроме углового позиционирования ось W используется для вращения детали, что расширяет технологические возможности станка.

Станок RA-90AT компании Mitsubishi с габаритными размерами 1440x2075x2030 мм обеспечивает производительность до 330 мм<sup>2</sup>/мин и достижимую шероховатость  $Ra = 0,6$  мкм. Станок оснащен антиэлектролизным генератором, устройством высокоскоростной автозаправки проволоки, системой адаптивного управления (функция Rower Master-3) с функцией экономичного расхода проволоки. Используется функция адаптивного управления Rower Master-4. Проектирование технологий обработки



на данных станках осуществляется на основе развитого программного обеспечения.

Высококачественные станки для проволочной вырезки выпускают японские компании Makino, Fanuc Ltd и Seibu Electric and Machinery Co., Ltd.

Станки серии «Robocut a-ic» отличаются качественной системой слежения за состоянием межэлектродного промежутка. Эта система определяет принцип оптимального управления процессом резания, который разработчики называют импульсным управлением на базе искусственного интеллекта. В результате использования высококачественной системы ЧПУ Fanuc и системы обратной связи по состоянию межэлектродного промежутка обеспечивается устойчивый высокоскоростной режим резания с поддержкой постоянной мощности резания и предотвращением разрыва проволоки.

В результате при резке латунной проволокой диаметром 0,25 мм достигается производительность около 250 мм<sup>2</sup>/мин, а проволокой диаметром 0,3 мм – 330 мм<sup>2</sup>/мин. Применение проволоки с покрытием позволяет повысить производительность до 360 мм<sup>2</sup>/мин. Высокопроизводительная резка на данных станках осуществляется переменным током высокой частоты, что позволяет практически предотвратить анодное окисление (антиэлектролизный эффект). В качестве опции поставляется специальный источник питания для «зеркальной» отделки, обеспечивающий достижение шероховатости поверхности  $Ra = 0,04...0,08$  мкм.

Компания Fanuc Ltd рекламирует самую быстродействующую систему автоматической заправки проволоки с величиной рабочего цикла 12 с. В станках серии M компании Seibu (ELO - Erosion GmbH) также используются современные средства автоматизации процесса резания, в частности система автоматической заправки проволоки и эффективная система управления процессом резания.

В последние десять - пятнадцать лет значительную активность на рынке электроэрозионного оборудования проявляют предприятия Тайваня (MAX SEE, ECOWIN, Fair Friend Group, CHMER и др.).

Так, компания MAX SEE производит и поставляет следующие станки:

- электроэрозионные копировально-прошивные с подвижным столом (модели P 26, 36, 46, 56), с подвижным хоботом (модели P40, 50, 58, 66, 207, 307), ZNC (одна ось Z управляемая от ЧПУ) и CNC (4 оси управляемые от ЧПУ) (**рис. 1**);
- электроэрозионные проволочно-вырезные струйного (модели FW 325, 530, 540, 645, 840, 1270) и погружного (модели SW 325, 530, 540, 645, 840, 1270) типа, с автоматической заправкой проволоки (серии BFW и BSW) (**рис. 2**).
- Показательным является опыт эксплуатации 30 единиц станков фирмы MAX SEE на крупнейшем авиадвигателестроительном предприятии ФГУП «НТП ГТС «Салют», использующем в основном производстве.

Среди европейских производителей оборудования наиболее известны компании CHARMILLES, AGIE (Швейцария), ONA (Испания). Станок «Robofil 690» компании Charmilles обеспечивает максимальную производительность 300 мм<sup>2</sup>/мин при достижимой шероховатости  $Ra = 0,28$  мкм. Рекомендуемый диаметр проволоки 0,25 мм, дополнительные диаметры 0,1, 0,2 и 0,3 мм. В конструкции станка использована станина из полимербетона и система термостабилизации диэлектрика, что существенно сказывается на точности обработки. Используются безазорные алмазные направляющие проволоки и надежная система ее заправки. Предусмотрена возможность обработки как при погружении в ванну, так и при прокатке диэлектрика вдоль ЭП. Благодаря оптическим линейкам обеспечивается точность позиционирования  $\pm 0,5$  мкм.

Модификации станков 2030SI-TW, 4030SI-TW, 6030SI-TW обеспечивают последовательный обход контура в два перехода с использованием проволоки диаметром 0,25 мм (черновой проход) и 0,1 мм (чистовой проход). На автоматическую замену проволоки затрачивается около 45 с. По данным фирмы-изготовителя, двухпроволочная вырезка (twin-wire cutting) позволяет повысить производительность обработки на 30...60%.



Таблица 2  
Технические характеристики проволочно-вырезных станков серии АРТА

Модель	Размеры заготовки, мм	Ход по осям, мм					b, град.	Габариты станочного модуля, см	Число координат	Масса, кг
		X	Y	Z	U	V				
АРТА 120	250x160x80	125	200	*	—	—	—	123x70x154	2	930
АРТА 150	250x160x80	125	200	80	40	40	12–30	123x70x160	5	1000
АРТА 220	250x250x80	200	200	*	—	—	—	150x70x154	2	1140
АРТА 250	250x250x80	200	200	80	40	40	12–30	150x70x154	5	1190
АРТА 320	430x270x120	250	250	*	—	—	—	103x95x179	2	1190
АРТА 340	430x270x120	250	250	*	40	40	9–30	103x95x179	5	1270

**b – максимальный угол наклона проволоки, зависящий от толщины заготовки. \*Ручная установка.**

Отечественные производители представлены на рынке проволочно-вырезным оборудованием среднего технического уровня. Станок модели СК96Ф3/Ф5 позволяет осуществлять пятикоординатную обработку заготовок с максимальными размерами 460x410x150 мм и массой до 150 кг. Ход по координатам X и Y – 250 мм, по координатам U и V – 20 мм, по координате Z (пиноль головки) – 150 мм. Угол наклона проволоки зависит от высоты заготовки и для заготовок высотой 20, 70 и 150 мм составляет соответственно  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 7^\circ$ . Станок оснащен системой КЧПУ «Арта-тест», обеспечивающей графический контроль контуров детали с визуализацией процесса обработки, просмотр и редактирование УП в процессе обработки.

Станок ЭИ250Ф4 производится ОАО «Санкт-Петербургский завод прецизионного станкостроения». Станок предназначен для изготовления деталей сложной конфигурации в том числе профилей с переменным углом наклона и линейчатых поверхностей с различными контурами в верхней и нижней плоскостях обрабатываемого изделия. Предусмотрено выполнение операций копирования формы электрода-инструмента небольшой площади (клейма различной сложности) и гравировки с нанесением знаковой информации.

Станок имеет 5 управляемых координат с величинами перемещений в миллиметрах по осям X, Y, Z, U, V соответственно 300/250/150/ $\pm 30$ / $\pm 30$  мм. Наибольшая скорость перемещений по осям X и Y составляет 100 мм/мин.

В конструкции использованы круглые алмазные направляющие для проволоки диаметром 0,1/0,2/0,25 мм и керамические направляющие для проволоки диаметром 0,05...0,07 мм. Скорость протяжки проволоки регулируется в пределах 0...6 м/мин. Наибольший угол наклона проволоки при соответствующей толщине реза, град/мм:  $\pm 44/30$ ,  $\pm 23/70$  и  $\pm 12/150$ . Генератор импульсов, собранный на базе современных MOS-транзисторов, обеспечивает регулировку частоты в пределах 10...200 кГц с шагом 1 кГц и длительности импульсов в пределах 0,2...3,2 мкс с шагом 0,1 мкс. Амплитуда напряжения рабочих импульсов 150 В, максимально потребляемый средний ток 20 А. Станок оснащен эффективной системой КЧПУ и адаптирован к САПР UNICAM. Габаритные размеры станка 3x2,76x1,7 м, масса 1410 кг.

НПК «Дельта-Тест» выпускает и модернизирует электроэрозионные проволочно-вырезные станки нескольких моделей. Технические характеристики выпускаемых станков приведены в табл. 2.

Используется погружная схема обработки с подъемом ванны. Габариты системы ЧПУ/генератор импульсов 470x550x1600 мм. Рабочие среды: водопроводная и деионизированная вода. Применяется латунная, медная, молибденовая проволоки диаметром 0,05...0,3 мм (опция – 0,012 мм). Максимальная скорость резания по стали, мм<sup>2</sup>/мин – 110. Точность координатных перемещений –  $\pm 5$  мкм.

В станках применяется система ЧПУ АРТА-Х7 на основе промышленных компьютеров фирмы Advantech. Генератор импульсов АРТА-3М-5 на базе мощных MOS-транзисторов с микропроцессорным управлением гарантирует высокую производительность при использовании в качестве рабочей среды даже технической воды. СЧПУ обеспечивает широкий диапазон регулировки параметров тока, защиту от обрыва проволоки, выбор оптимальных параметров режима обработки, работу с проволокой малого диаметра (0,012...0,05 мм). Достижимая шероховатость поверхности Ra = 0,5 мкм. СЧПУ обеспечивает набор автоматических циклов и дополнительных функций, автоматическое сохранение параметров, включает в себя встроенную подсистему справочной информации и диагностики.

Одна из последних разработок компании – станок Арта-450 – представлена на рис. 3.

**Б.П. Саушкин**

Литература:

1. Ю.С.Елисеев, Б.П.Саушкин. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники.– М.: Изд–во МГТУ им. Н.Баумана. 2010.– 437 с.
2. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей/ Под ред. Б.П. Саушкина.– М.: Изд. Дрофа, 2002. – 656 с.
3. Саушкин Б.П. Инновационные процессы в области физико-химических методов и технологий. Материалы круглого стола: «Знания – главный ресурс инновационного развития». Международный форум «Высокие технологии - 2009». 2009.- 87-90 с.

продолжение в №9 (77)