

А. Н. Зайцев

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНЫЕ СТАНКИ 2000 ГОДА

*Уфимский государственный авиационный технический университет,
ул. К. Маркса 12, г. Уфа, 450025, Башкортостан, Россия,
Предприятие «Новотэч»*

На последних международных симпозиумах по электрическим методам обработки ISEM 12 (г. Аахен, Германия, май 1998 г.), ISEM 13 (г. Бильбао, Испания, май 2001 г.), на международной выставке по металлообработке ЕМО-2001 (Ганновер, Германия, сентябрь 2001 г.) были убедительно продемонстрированы впечатляющие технологические результаты, достигнутые с помощью импульсной электрохимической обработки (ЭХО) вибрирующим электродом – инструментом [1, 2]. Избирательность прямого копирования не хуже 1 мкм, повторяемость одноименных размеров в партии деталей не более 10 мкм, шероховатость обработанной поверхности Ra 0,05 – 0,2 мкм.

Сущность данного способа состоит в следующем (рис.1) [1]. Через межэлектродный промежуток (МЭП) под давлением прокачивают электролит (водный раствор нейтральной кислородосодержащей соли). Электрод-инструмент (ЭИ) совершает гармонические колебания, соосные с направлением подачи. МЭП соединен с импульсным униполярным источником питания, имеющим «крутопадающую» вольт-амперную характеристику. Подача униполярных импульсов тока синхронизирована с гармоническими колебаниями ЭИ. При этом импульс тока начинают пропускать в фазе φ^* , предшествующей фазе $\varphi_{\text{нп}}$ наибольшего сближения электродов. В этот момент в МЭП возрастает давление электролита P_e (см. рис. 1). Завершают подачу импульса тока после прохождения фазы $\varphi_{\text{нп}}$. Продолжающееся после завершения импульса тока колебательное движение ЭИ обуславливает увеличение МЭП и соответственно улучшение условий для обновления электролита к следующему импульсу тока.

В течение всего процесса обработки система автоматического управления источником питания регулирует амплитуду тока I_a , обеспечивая заданное технологическое значение напряжения U_{is} в фазе нижнего положения ЭИ. Таким образом, для каждого единичного импульса мы имеем дело с источником питания, имеющим вольт-амперную характеристику (ВАХ), характерную для источника тока, а для группы импульсов в фазе $\varphi_{\text{нп}}$, алгоритмически обеспечивается ВАХ источника напряжения.

Для описанного способа характерно, что в течение всего периода колебания ЭИ физически *не контактирует* с деталью и *импульс тока не прерывается* в фазе $\varphi_{\text{нп}}$. Последнее создает известные технологические преимущества по сравнению с другими известными схемами импульсной ЭХО вибрирующим ЭИ и импульсно-циклической ЭХО.

Исследования, проведенные авторским коллективом предприятия «Новотэч», позволили существенно развить описанный способ и создать на этой основе прецизионные электрохимические копировально-прошивочные станки нового поколения. Так, в 2000 году начат серийный выпуск универсальных копировально-прошивочных электрохимических станков моделей ЕСМ-1500А (изготовители: Стерлитамакский станкостроительный завод, г. Стерлитамак и НКТБ «Искра», г. Уфа) и РЕМ-1360 (изготовители: фирмы РЕМ, WIBA-ЕСВ, Германия)¹.

¹ Станки моделей ЕСМ-1500А и РЕМ-1360 комплектуются источниками питания, системами автоматического управления, системами подачи и регенерации электролита, выполненными по проекту фирмы «Новотэч лтд.»

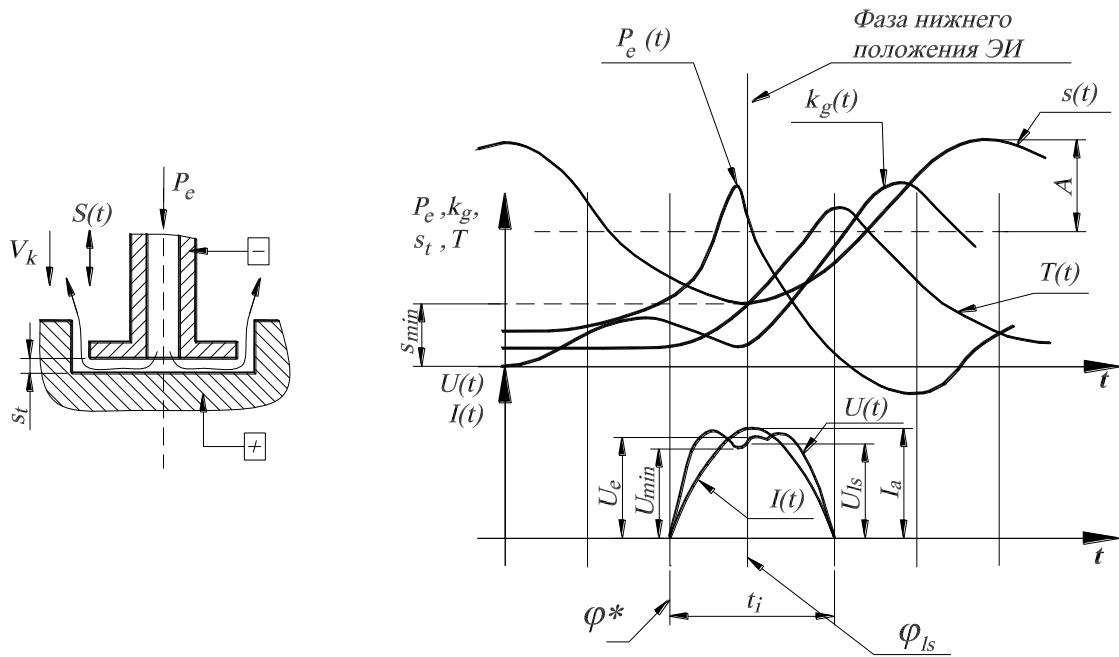


Рис. 1. Изменение давления (P_e), температуры (T_e) электролита, относительного газонаполнения (k_g), межэлектродного промежутка (s_i), напряжения (U) и средней напряженности электрического поля в МЭП во время протекания импульса тока с длительностью t_i и амплитудой I_a : φ_{ls} – фаза наибольшего сближения электродов, вычисленная относительно начала подачи импульса тока; U_e – напряжение в точке локального максимума; U_{ls} – напряжение в фазе наибольшего сближения электродов; U_{min} – локальный минимум напряжения; A – амплитуда колебания.

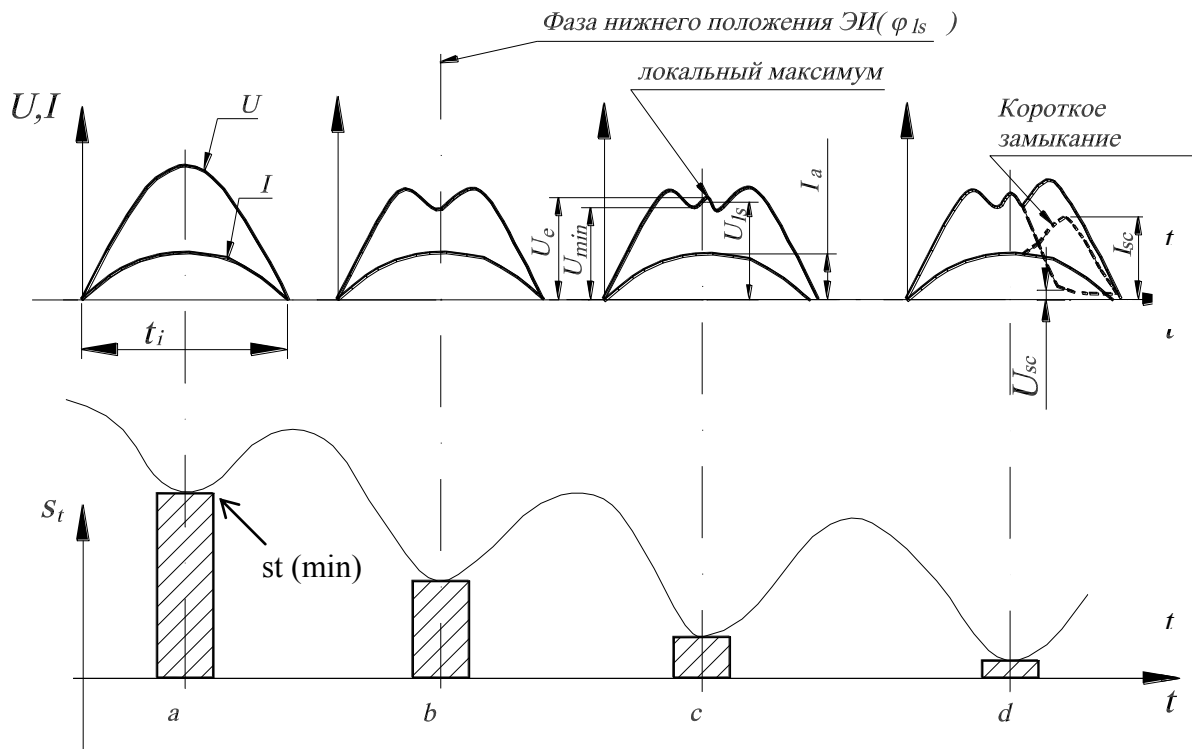


Рис. 2. Схема изменения формы импульса напряжения в зависимости от уменьшения величины торцевого МЭЗ(s_i).

Существенные отличия нового способа ЭХО, положенного в основу принципа действия новых станков, состоят в следующем:

Во-первых, скорость подачи электрод-инструмента V_k увеличивают (уменьшая, рабочий торцевой МЭЗ) до образования в центральной части вольт-временной характеристики импульса напряжения на МЭП третьего локального максимума (рис. 2,с) [3]. Его появление обусловлено комплексным изменением величины торцевого МЭЗ, давления P_e , газонаполнения k_g и температуры электролита T_e в МЭП (см. рис. 1). При определенных оптимальных параметрах локального максимума U_e может быть получена наиболее высокая точность копирования и производительность обработки при минимальной энергоемкости. Чрезмерное увеличение скорости перемещения V_k (уменьшение торцевого МЭЗ) и соответственно возрастание величины локального максимума U_e , как правило, сопряжено с возникновением аварийной ситуации типа «электрический пробой» или «короткое замыкание» (см. рис. 2,с). Фактически величина рабочего торцевого МЭЗ в оптимальных условиях составляет в зависимости от режима обработки $s=3-10$ мкм.

Во-вторых, в паузе между импульсами прямой полярности подают специальной формы импульсы напряжения обратной полярности, что позволило устранить катодные отложения на рабочей поверхности ЭИ [4] и снизить шероховатость поверхности (Ra 0,05–0,1 мкм) [5].

В-третьих, в паузе между рабочими импульсами для повышения точности копирования за счет избирательной и контролируемой пассивации обрабатываемой поверхности подают специальной формы и амплитуды импульсы малого напряжения прямой полярности [6].

Таким образом, концепция развития способа импульсной ЭХО вибрирующим ЭИ определяется оптимизацией процесса за счет управления физико-химическими процессами на поверхности электродов в паузе между рабочими импульсами. При этом перед подачей рабочего импульса тока создаются условия, обеспечивающие максимальную локализацию [6], а после окончания действия рабочего импульса обеспечивается формирование наилучшего качества поверхности электродов (как инструмента, так и детали [4–6]).

Базовый комплект электрохимического станка ЕСМ-1500А включает (рис. 3 и 4, табл.1):

- механическую систему;
- систему автоматического управления;
- биполярный импульсный источник технологического тока;
- систему защиты от коротких замыканий;
- систему контроля, очистки и подачи электролита

В качестве опционной поставки к станку предлагаются автономное устройство охлаждения и система регенерации электролита. Последняя позволяет реализовать технологический процесс удаления шестивалентного хрома.

Механическая система станка ЕСМ-1500А имеет коррозионностойкое исполнение; выполнена в вертикальной С –образной компоновке и относится к камерному типу.

Использование в конструкции высокоточных приводов, датчиков перемещения и направляющих качения позволяет обеспечить высокую точность позиционирования заготовки.

Технологическое преимущество станку ЕСМ-1500А, как универсальному станку, создает наличие двухкоординатного крестового стола фирмы Дойче Стар с выводом цифровой индикации о положении рабочего органа на дисплей системы автоматического управления.

Система автоматического управления (рис. 6–9) обеспечивает эффективную адаптацию процесса ЭХО к изменению внешних условий, гарантирует стабильность достижения заданной точности и шероховатости поверхности путем формирования комплекса управляющих воздействий на механическую систему, источник технологического тока, систему подготовки и подачи электролита [7].

Алгоритм работы системы управления дает возможность осуществить полный технологический цикл обработки детали на станке без обязательного присутствия оператора. Она содержит развитый интерфейс технолога-оператора, позволяющий создавать технологические программы обработки детали с изменением параметров режима по мере врезания (рис. 9), использовать систему встроенных технологических циклов вспомогательных операций и локальную базу данных типовых и оригинальных технологических программ (рис.7), производить запись изменения основных параметров режима в течение времени выполнения всей технологической операции. Последнее создает своеобразный паспорт конкретной технологической операции, позволяет осуществлять анализ причин технологического брака и производить статистические оценки при обработке партии детали. Весьма эффективен режим самообучения, при котором система запоминает все действия технолога в процессе отладки режимов обработки, автоматически создает технологическую программу, копирующую эти действия, а затем в точности воспроизводит их при обработке последующих однотипных деталей. Опытный технолог-оператор больше не требуется.

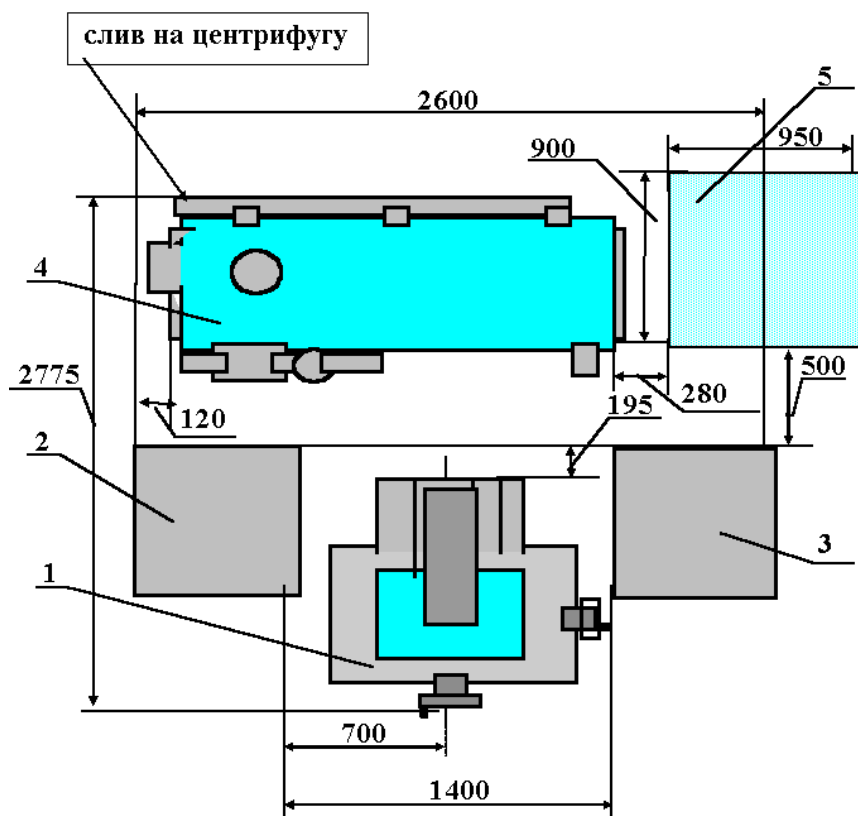


Рис. 3. Схема размещения оборудования станка ЕСМ-1500А: 1 – станок ЕСМ-1500А; 2 – генератор технологического тока; 3 – стойка системы управления; 4 – гидроблок; 5 – холодильник гидроблока (опционная поставка).



Рис. 4. Общий вид станка ЕСМ-1500А (слева направо расположены: гидроблок, генератор технологического тока, механическая система, стойка системы управления).

Таблица 1. Технические параметры станков моделей ЕСМ-1500А и ЕСМ-3000А

Параметры станка	ЕСМ-1500А	ЕСМ-3000А
Наибольший вертикальный ход стола по оси Z, мм	250	250
Поперечный ход стола по оси Y, мм	150	150
Продольный ход стола по оси X, мм	250	250
Размер рабочей поверхности стола, мм	300×250	300×250
Масса заготовки, кг	100	100
Наибольшее расстояние от рабочей поверхности стола до торца электрододержателя, мм	300	300
Технологический ток в импульсе, А	1500	3000
Максимальный средний ток, А	270	520
Точность позиционирования, мм	0,003	0,003
Шероховатость обработанной поверхности Ra, мкм		
торцевой	0,05–0,2	0,05–0,2
боковой	0,4–0,6	0,4–0,6
Напряжение технологического тока в импульсе, В	6–15	6–15
Объем электролита, м ³	0,65	0,65
Максимальная скорость обработки, мм/мин	0,35	0,35
Потребляемая мощность, кВА	18	30
Занимаемая площадь, м ²	8	10
Масса станка, кг	3500	4100



Рис. 5. Общий вид станка РЕМ-1360 (слева направо расположены: генератор технологического тока, механическая система, стойка системы управления).



Рис. 6. Общий вид управляющей панели стойки управления.

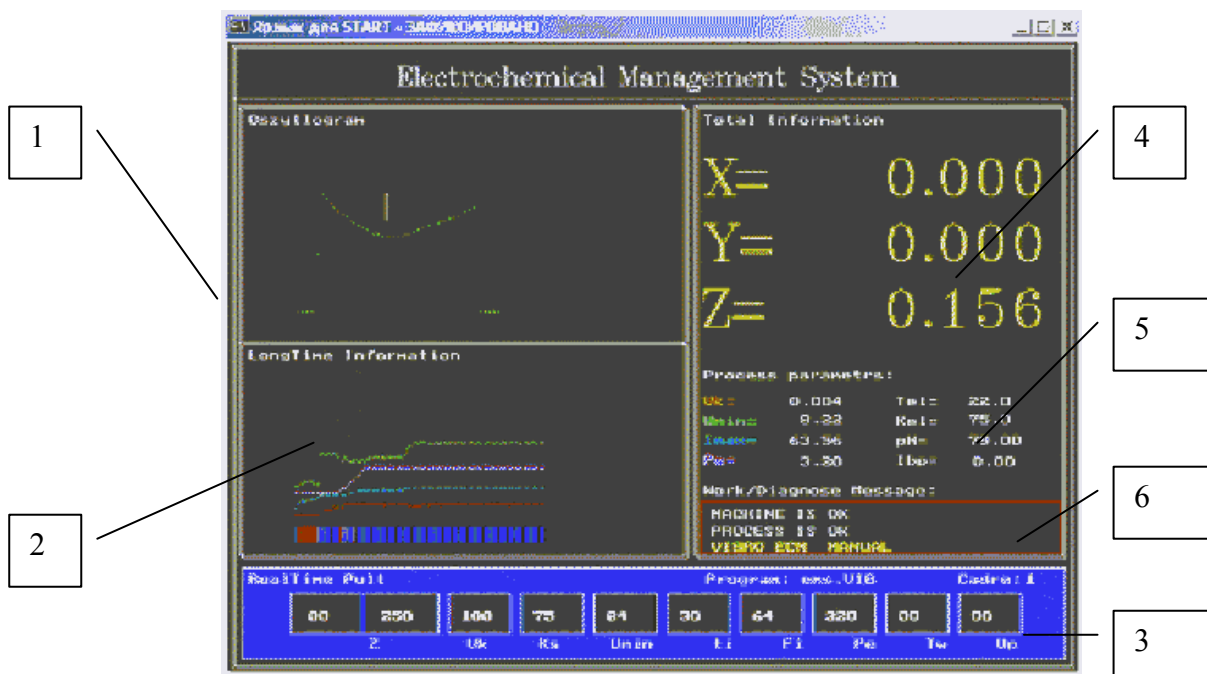


Рис. 7. Информационное окно Базового режима на дисплее системы управления: 1 – зона осциллограммы рабочего импульса напряжения; 2 – зона диаграмм основных параметров процесса обработки; 3 – зона отображения параметров текущего кадра технологической программы; 4 – зона индикации положения осей станка; 5 – зона числовых значений основных параметров процесса обработки; 6 – зона специальных сообщений.

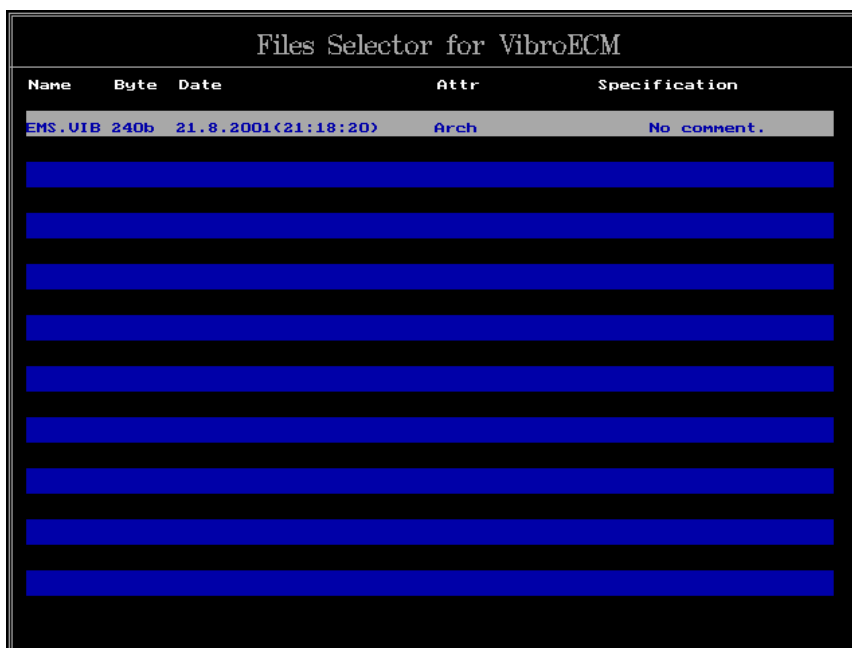


Рис. 8. Окно просмотра базы данных технологических программ.

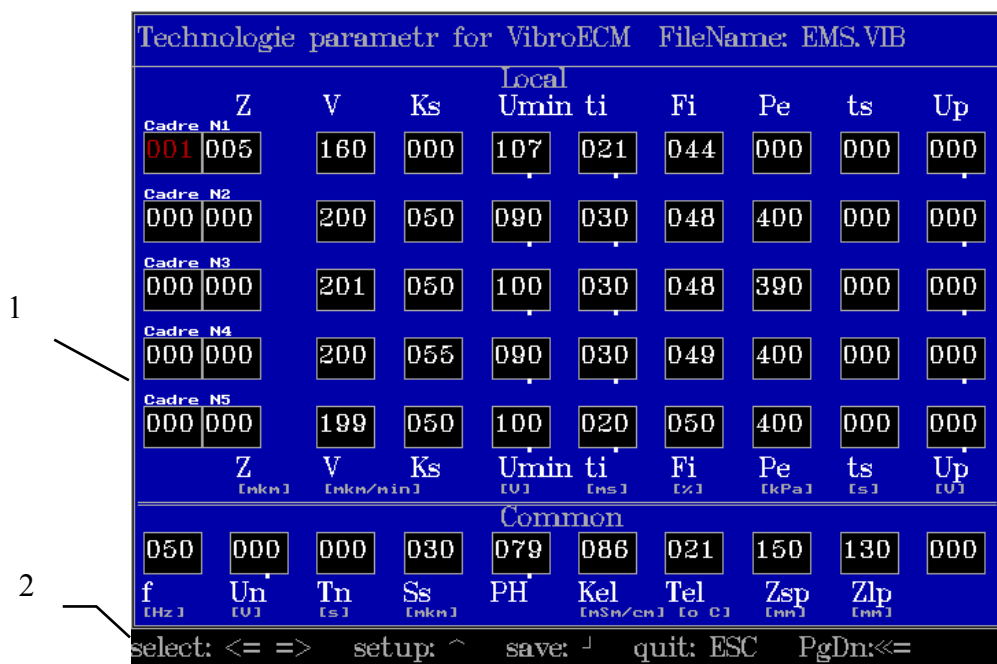


Рис. 9. Окно редактирования кадров технологической управляющей программы: 1 – зона параметров пяти кадров технологической программы; 2 – зона общих параметров технологической программы.

Импульсный источник технологического тока с воздушным охлаждением имеет крутопадающую вольт-амперную характеристику.

Изменение параметров импульсов тока осуществляется в пределах технических характеристик по командам системы автоматического управления. Форма импульсов тока задается программно и, при необходимости, может быть изменена, например, для выполнения специальных технологических операций.

Система защиты от коротких замыканий содержит три основных контура:

- контур прогнозирования условий возникновения короткого замыкания или электрического пробоя в межэлектродном пространстве;
- контур быстрого выключения рабочего тока при возникновении короткого замыкания;
- контур защиты силовых элементов источника тока от перегрузок.

Система подготовки и подачи электролита содержит следующие основные подсистемы:

- подсистема хранения и подготовки электролита;
- подсистема подачи электролита;
- подсистема контроля и регулирования температуры электролита;
- подсистема контроля pH;
- подсистема контроля проводимости электролита.
- подсистема контроля зашламленности и концентрации ионов Cr (VI).

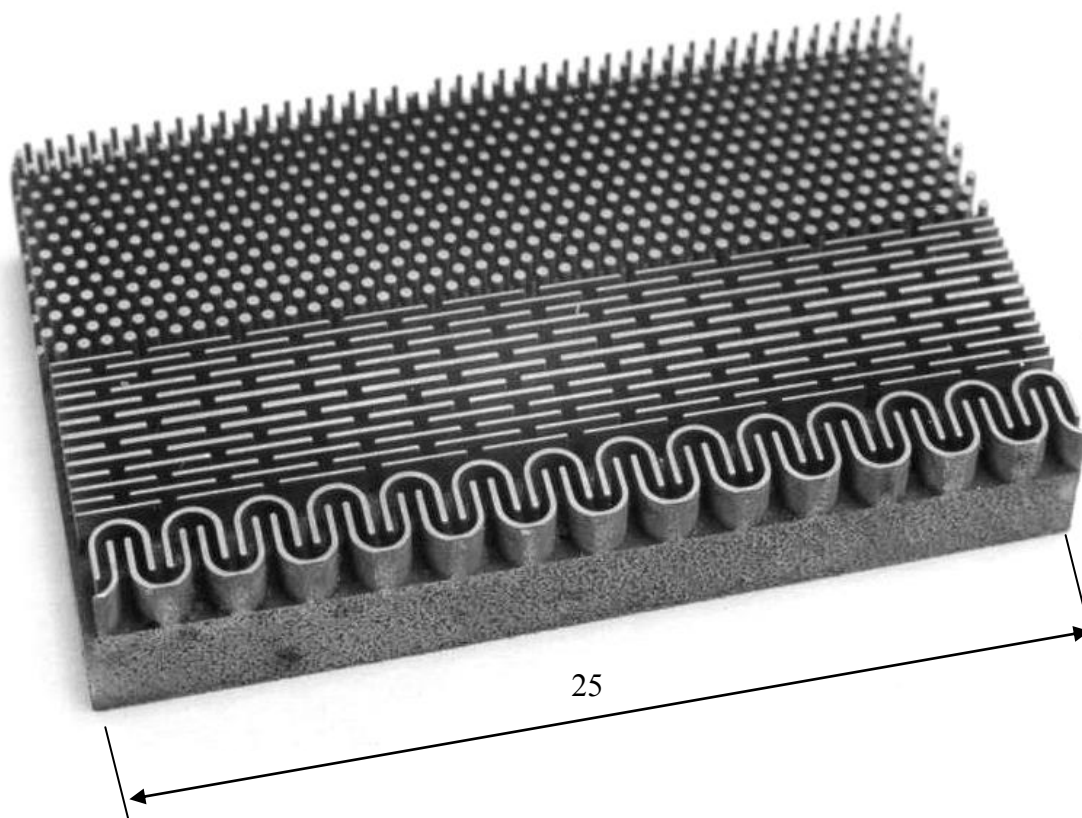


Рис. 10. Общий вид стального образца с выступами различной формы.

Таблица 2. Технические параметры станка модели PEM-1360

Параметры станка	PEM-1360
Наибольший вертикальный ход стола по оси Z, мм	220
Наибольшее расстояние от рабочей поверхности стола до торца электрододержателя, мм	360
Размер рабочей поверхности стола, мм	400×450
Технологический ток в импульсе, А	1500
Максимальный средний ток, А	270
Точность позиционирования, мм	0,001
Шероховатость обработанной поверхности Ra, мкм	
торцевой	0,2
боковой	0,6–0,8
Напряжение технологического тока в импульсе, В	6–15
Объем электролита, м ³	0,65
Максимальная скорость обработки, мм/мин	0,35
Потребляемая мощность, кВт	18
Занимаемая площадь, м ²	8
Масса станка, кг	3700

Периодически по мере загрязнения продуктами электрохимических реакций отработанный электролит очищается путем пропускания его через регенерационную систему, снабженную пресс-фильтром и специальным баком. Очищенный электролит после восстановления физико-химических свойств возвращается в основной бак станка для дальнейшего использования. Частицы шлама, отделяемые пресс-фильтром, собирают в контейнер и отправляют на пункты официальной утилизации.

Базовый комплект электрохимического станка PEM-1360 (рис. 5, табл. 2) аналогичен станку ECM-1500A. Основное отличие состоит в конструкции механической системы станка PEM-1360. Она выполнена из натурального гранита, имеет вертикальную двухстоечную порталную компоновку и относится к камерному типу. Движение подачи и движения вибратора расположены в кинематической ветви инструмента. Использование высокомоментного бесщеточного двигателя постоянного тока нового поколения, установленного непосредственно на ходовом винте, позволяет получить простую и надежную конструкцию узла подачи. Станок обладает повышенной жесткостью и имеет прецизионное исполнение узлов рабочих перемещений.

В качестве одного из пунктов штатных тестовых испытаний описанных моделей станков, демонстрирующих их возможности по точности обработки, изготавливают образец из хромистой стали марки 40X13 (рис. 10). Особенностью образца является то, что он вырезан из цельной заготовки и содержит ряды цилиндрических и прямоугольных выступов (см. рис. 10). При этом различие, например, диаметров цилиндрических выступов между рядами составляет ~20 мкм, а разброс диаметров выступов в ряду составляет 5–7 мкм.

Заключение

Применение описанного способа импульсной ЭХО вибрирующим ЭИ позволяет получать высокую точность копирования, соизмеримую с той, что может быть получена на современном оборудовании для электроэрозионной обработки. Принципиальное отсутствие износа ЭИ и дефектных слоев на обработанной поверхности, возможность достижения намного более высокой производительности, при которой получается поверхность с шероховатостью $Ra < 0,05-0,2$ мкм обеспечивает новому методу ЭХО очевидное преимущество перед ЭЭО и традиционными методами механической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология и оборудование для прецизионной электрохимической размерной обработки // Технология металлов. 2000. № 1. С. 20–24.
2. Performing holes of small diameter in steel foil using method of multi-electrode precise electrochemical machining / *A.N.Zatsev, A.L.Belogorsky, I.L.Agafonov u.o.* // Proceedings of the 12-th International Symposium for Electromachining ISEM XII. Germany, Aachen. P.555–564. 1998.
3. Пат. 2038928(RU). МКИ В 23 Н 3/02. Способ электрохимической размерной обработки / *Н.З. Гимаев, А.Н. Зайцев, С.В. Безруков (RU)*. Опубл. в БИ. № 19. 1995.
4. Investigation of cathode sedimentation under pulse ECM of steels with electrode tool vibration / *N.A. Amirchanova, M. Brussee, A.N. Zaitsev u.o.* // Proceedings of the 13-th International Symposium for Electromachining ISEM XIII. Spain, Bilbao. P. 313–325. 2001.
5. Пат. 5833835 США. МКИ⁶ В 23 Н 3/00. Способ и устройство для электрохимической обработки биполярными импульсами тока / *Н.З. Гимаев, А.Н. Зайцев, А.Л. Белогорский и др.*
6. Пат. 6231748 США. МКИ⁷ В23Н 3/02. Способ и устройство для электрохимической обработки / *И.Л. Агафонов, Р.А. Алимбеков, А.Л. Белогорский, А.Н. Зайцев и др.*
7. The control of the process of pulse electrochemical machining with electrode vibration on the base of spectrum analysis of low-frequency component of gap electric resistance / *I.L. Agafonov, R.R. Muchutdinov, A.N. Zaitsev u.o.* // Proceedings of the 13-th International Symposium for Electromachining ISEM XIII.- Spain, Bilbao. P. 213–230. 2001.

Поступила 05.10.2001

Summary

The main principles of the work of precision electrochemical copying machines ECM-1500A and PEM – 1360 are stated. Also the description of their general layout, constructive and technical characteristics and outlet technological parameters are cited. Special attention is given to the description of the ways of using the process of electrochemical machining, system framework of automatic control and interface of the technologist-operator.