

если анодная поляризуемость мала, а катодная велика, то результирующий осадок оказывается равномерным. Действительно, даже если за катодный период образовался выступ, то за анодный период он будет особенно активно растворяться. Наоборот, при большей анодной поляризуемости реверсивный ток приведет к образованию выступов, а затем и дендритов.

4. До сих пор количественно не рассмотрена следующая ситуация, на которую впервые обратил внимание Ю.М. Полукаров: при наложении переменного тока на постоянный в определенные периоды градиент приповерхностной концентрации ионов-реагентов оказывается обратным, то есть в процессе осаждения имеется спад их концентрации от поверхности вглубь раствора. Результатом этого может быть заметный выравнивающий эффект даже в отсутствие специальных поверхностно-активных веществ. Это обусловлено тем, что скорость осаждения на выступах оказывается в результате такого градиента ниже, чем во впадинах. Такой эффект наблюдался и экспериментально.

5. При наличии в растворе двух типов разряжающихся ионов импульсные режимы позволяют выделять мультислойные осадки, которые, однако, при более строгом рассмотрении являются осадками с модуляцией состава по толщине, так как между слоями образуются граничные области промежуточного состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гамбург Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. М., 1997.
2. *Ibl N.* Some theoretical aspects of pulse electrolysis // *Surface Technology*, 1980, V.10., No.2. P.81.
3. Бек Р.Ю., Гамбург Ю.Д., Кудрявцев Н.Т. Электроосаждение блестящей меди при наложении переменного тока на постоянный // *Журнал физ. химии*. 1962. № 10. С. 2224–2226.
4. Кошев А.И., Поддубный Н.Н. Влияние параметров электрохимического процесса на равномерность гальванопокрытий в случае реверсированного тока // *Электрохимия*. 1978. Т. 14. № 10. С. 1485–1489.
5. Гамбург Ю.Д. Электрохимическое осаждение сплавов с модулированным по толщине составом. Обзор проблемы // *Электрохимия*. 2001. Т.37. № 6. С. 686–692.

Поступила 03.05.02

Summary

Basic concepts and techniques of electrochemical deposition of metals and alloys by the pulse current are discussed in the review. The following problems are involved: the basic diffusion problems, the role of pauses and anodic pulses, maximum current densities, current distribution, current efficiency, impurities codeposition, deposition of alloys and compositionally modulated structures.

Ю.С. Волков, А.В. Никифоров, С.А. Кананадзе, М.В. Шорин

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ РАЗМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Московская государственная академия
приборостроения и информатики
ул. Стромьинка, д. 20, г. Москва, 107076, Россия*

Системы автоматического управления размерной электрохимической обработкой (РЭХО) мало похожи, например, на те, которые применяют в резании. Это объясняется особенностями процесса РЭХО, как объекта управления. Однако такие особенности не всегда учитываются в полной мере, что приводит к методологической путанице, снижению качества управления.

В данной статье сделана попытка увязать построение системы управления с особенностями копировально-прошивочных операций РЭХО.

Эти операции, как и любые другие, характеризуют конечными и интегральными показателями [1]. Конечные относятся к детали (заготовке) и являются управляемыми, как например, отклонения размеров от чертежа и высота микронеровностей. Как правило, задача управления РЭХО однокритериальная, с единственным интегральным показателем, обычно в виде продолжительности изготовления годной детали.

Различают инструменты трех видов: 1) на всей рабочей поверхности электрический потенциал относительно заготовки одинаковый, как например, на цельнометаллическом инструменте; 2) потенциал на рабочей поверхности изменяется от точки к точке, как в секционных инструментах или с плохо проводящим покрытием; 3) с непроводящими участками.

Любой из инструментов может быть корректированным или некорректированным и подаваться прямолинейно поступательно, с вращением относительно неизменной оси либо по более сложным законам движения.

Далее рассмотрены операции при поступательной подаче цельнометаллического некорректированного инструмента, у которого рабочая поверхность такая же, как у будущей детали.

Рабочие поверхности катода-инструмента и анода-заготовки разделены промежутком, необходимым для воплощения принципа действия РЭХО. Обычно местные радиусы кривизны электродов 1 и 2 намного меньше ширины промежутка 3, и справедливо понятие местного зазора a , как наименьшего расстояния между электродами (см. рисунок).

Для большинства операций зазор a зависит от координат точки его измерения x_u, y_u, z_u на инструменте 1 и, значит, заготовка 2 – это объект с распределенной управляемой величиной [2]. Поверхность заготовки можно представить как поверхность инструмента, которая смещена по внешним нормальным на расстояния, равные местным зазорам.

Можно совместить экстремальные точки A и B на электродах (см. рисунок), мысленно передвигая инструмент 1 к заготовке 2 в направлении подачи v_u на расстояние, равное торцевому зазору a_m между этими точками. Тогда отклонение размеров заготовки от чертежа (инструмента) представляется как наименьшее расстояние между поверхностью заготовки 2 и перемещенной поверхностью инструмента 4:

$$\Delta = a - a_m \cos \gamma \quad (1)$$

где γ – угол между направлением подачи и местной внешней нормалью к поверхности инструмента. Отклонение Δ зависит от распределения зазора по промежутку, то есть от точки измерения зазора. Наличие зазора (бесконтактность) – причина систематической погрешности РЭХО, а его нестабильность – случайного разброса размеров в партии деталей.

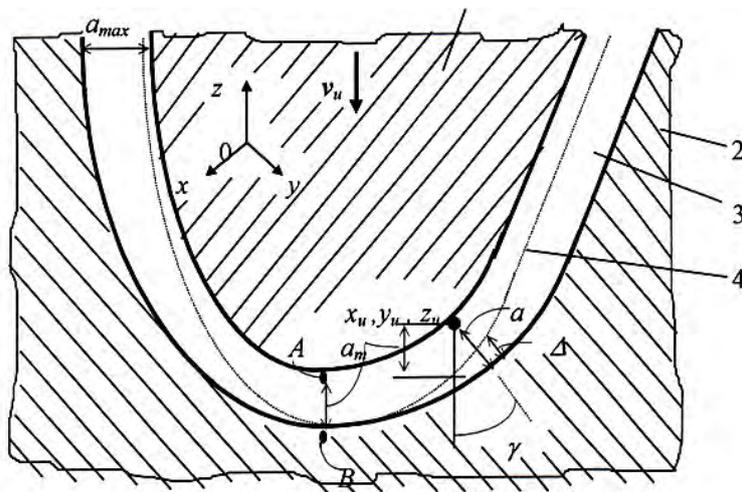


Схема межэлектродного промежутка при РЭХО: 1 – катод-инструмент, 2 – анод-заготовка, 3 – промежуток с зазором a , 4 – поверхность инструмента после смещения к заготовке на расстояние a_m

Особенность РЭХО – структурная сложность процесса и большое число величин (обычно более десятка), которые влияют на местные зазоры и вообще на конечные показатели. Процесс опреде-

ляется величинами, относящимися к электрическим (напряжение, длительности импульсов и паузы), гидравлическим (давление прокачки, расходы раствора и вводимого газа и другие), кинетическим (скорости подачи и отвода инструмента, продолжительности подачи, отвода и неподвижного состояния). Ряд величин $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n$ характеризуют свойства раствора. Среди них и такие, которые нестабильны во времени и медленно изменяются от операции к операции: температура, электропроводность, вязкость, содержание шлама и газа, концентрации анионов и катионов, водородный показатель. Величины, характеризующие свойства раствора в баке, то есть на входе в промежуток, далее обозначаются в общем виде как b_{il} .

Эти величины нецелесообразно использовать, как управляющие. В качестве таковых $c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_m$ обычно служат напряжение, длительности импульса и паузы, скорости подачи инструмента, давление прокачки раствора. Управляющие величины далее обозначены как c_j .

Поскольку распределение зазоров по промежутку неизвестно, то только по этой причине управление процессом оказывается разомкнутым по отношению ко всей конфигурации заготовки. Не применяются средства для определения наибольшего отклонения Δ , по которому следует вести управление объектом с распределенными параметрами.

Согласно выражению (1) систематическая погрешность наибольшая при $\gamma \rightarrow 90^\circ$. При γ_{\max} возникает наибольший (“боковой”) зазор a_{\max} , который и следует выбрать в качестве управляемой величины. Однако ее оперативно измерять невозможно, и обычно определяют прямо или косвенно только торцевой зазор a_m

$$a_m = a_m(c_j, b_{il}). \quad (2)$$

Этот зазор служит управляемой величиной. Однако его связь с максимальным зазором a_{\max} не всегда однозначная, особенно если меняются раствор и материал заготовки.

Вторая управляемая величина – высота микронеровностей R_a , которая также оперативно не измеряется. По опытным данным известны зависимости шероховатости от режима, и величины, при которых формируется окончательная поверхность детали, можно задать ограничением

$$R_{ad} < R_a(c_j, b_{il}), \quad (3)$$

где R_{ad} – требуемая шероховатость детали.

Детали окончательно формируются в стационарном режиме. Относительно инструмента поверхность заготовки не изменяется во времени, если местная линейная скорость съема

$$u = v_u \cos \gamma. \quad (4)$$

Соответственно этой скорости устанавливается местный зазор, зависящий от направляющего косинуса,

$$a = a(c_j, b_{il}, v_u \cos \gamma). \quad (5)$$

Управление точностью необходимо проводить соответственно тому, в каком режиме окончательно формируется поверхность детали.

В первом режиме, при РЭХО на постоянном или импульсном напряжении, электродные процессы проводятся в растворе, протекающем вдоль поверхностей электродов. К выходным участкам промежутка, где обычно возникает наибольший зазор a_{\max} , раствор подходит уже обогащенный продуктами обработки, возникшими на входных участках. Изменение свойств раствора определяется отношением технологического тока I к объемному расходу раствора Q , и в линейном приближении

$$a_{\max} = a_{\max 1} + k_a I / Q, \quad (6)$$

где k_a – постоянная, зависящая от условий обработки.

Зазор $a_{\max 1}$, который возник бы, если местные свойства раствора соответствовали величинам b_{il} на входе в промежуток, задается выражением (5). Изменение свойств раствора по длине промежутка тем сильнее влияет на наибольший зазор, тем больше отношение I/Q .

Во втором режиме электродные процессы проводятся в неподвижном растворе. Происходит только местное обогащение раствора продуктами обработки, и процессы на входных участках не влияют на наибольший зазор a_{\max} . Подобные режимы характерны для импульсно-циклической РЭХО, в которой анодное растворение протекает в течение импульса напряжения длительностью τ_u . За время паузы инструмент отводится, отработанный раствор удаляется из промежутка и заменяется свежим. В стационарном режиме приращение зазора после каждого цикла

$$\Delta a = \Delta a_m \cos \gamma. \quad (7)$$

Приращение торцевого зазора

$$\Delta a_m = \Delta a_m(a_m, \tau_u, U_m, b_{il}), \quad (8)$$

где a_m – торцевой зазор, τ_u – длительность импульса, U_m – амплитуда импульса, b_{il} – величины раствора на входе в промежуток.

Стабилизацией приращений торцевого зазора можно стабилизировать и зазоры во всем промежутке, в том числе и наибольший a_{\max} . Это легко обеспечить, поскольку приращения зазора Δa_m измеряются.

В общем случае операцию разбивают на три стадии. Предварительную проводят при постоянном напряжении, конечные показатели не учитывают и в пределах допустимых управлений обеспечивают

$$v_u = \max. \quad (9)$$

Промежуточная стадия – это переход от предварительной к заключительной с постепенным смягчением режима. Управление ведется так, чтобы этот переход завершился за кратчайшее время и сохранялась управляемость процесса, то есть его способность из текущей заготовки создать требуемую деталь. Это обеспечивают выбором двух координат по оси z , которые соответствуют началу и концу данной стадии.

Заключительная стадия должна быть определенной длительности, необходимой для установления стационарности и создания требуемой шероховатости. Управление ведется так, чтобы наибольший зазор a_{\max} был бы меньше допустимой погрешности обработки. Если этого добиться нельзя, то применяют скорректированный инструмент. Эту стадию завершают, когда координата экстремальной точки инструмента

$$z_{u.э} = z_{d.э} - a_m, \quad (10)$$

где $z_{d.э}$ – координата экстремальной точки детали.

В импульсно-циклическом режиме согласно выражениям (8) и (3) требуется выполнить условия

$$\begin{aligned} \Delta a_m &= \text{const}, \\ R_{a \partial} &< R_a(c_j, b_{il}), \\ v_{u.ср} &= \Delta a_m / (\tau_u + \tau_n) = \max, \end{aligned}$$

где τ_n – длительность токовой паузы.

При обработке на постоянном или импульсном напряжениях выполняют условия (6) и (3)

$$\begin{aligned} a_{\max} &= a_{\max 1} + k_a I/Q = \text{const}, \\ R_{a \partial} &< R_a(c_j, b_{il}), \\ v_u &= \max. \end{aligned}$$

В данном режиме обычно стабилизируют торцевой зазор a_m , чем лишь снижают разброс, но не стабилизируют зазор $a_{\max 1}$. Дополнительной стабилизацией отношения I/Q можно еще более сузить разброс размеров.

Во всех режимах обработки – импульсно-циклическом, на постоянном или импульсном напряжении, стабилизацией лишь торцевого зазора a_m нельзя обеспечить постоянство наибольшего зазора a_{\max} при любых растворах и заготовках. Этого можно добиться только применением технических средств для измерения наибольшего зазора.

Выводы

1. Сформулированы условия оптимального управления копировально-прошивочной операцией РЭХО с учетом режимов и стадий операции.
2. Предварительную стадию, не учитывая конечных показателей детали, можно проводить при наибольшей скорости подачи.
3. Предложено, на заключительной стадии стабилизировать отношение тока к расходу раствора и оперативно измерять наибольший зазор.
4. Начало и завершение промежуточной стадии выбирают так, чтобы при сохранении управляемости процесса по точности и шероховатости продолжительность всей обработки была бы наименьшей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В.* Математическая теория оптимальных процессов. М., 1969.
2. *Бутковский А.Г.* Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М., 1965.
3. *Артамонов Б.П.А., Волков Ю.С.* Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки. М., 1991.
4. *Иоффе В.Ф., Коренблюм М.В., Шавырин В.А.* Автоматизированные электроэрозионные станки. Л., 1984.

Поступила 04.07.02

Summary

During preliminary stage an electrode velocity is maximum. During final stage quotient current/solution expediter is stabilized, maximum space is measured and stabilized. Regimes of preliminary, intermediate and final stades are established so that duration of operation is minimum, when necessary accuracy and rough are achieved.
