

УДК 621.9.047

DOI: 10.12737/article_58ef80901e6c46.92255316

Х.М. Рахимьянов, д.т.н.,
С.И. Василевская, аспирант
(Новосибирский государственный технический,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20)
E-mail: kharis51@mail.ru

Выбор электролитов для электрохимической обработки отверстий малого диаметра в меди

Рассмотрены вопросы выбора электролитов для электрохимической прошивки отверстий малого диаметра в меди. Показаны пути повышения производительности и точности обработки неподвижным катодом-инструментом.

Ключевые слова: электрохимическая обработка; межэлектродный зазор; анодное растворение; удельная электропроводность; кинематическая вязкость; выход металла по току; электролит; поляризационные исследования.

Kh.M. Rakhimyanov, D. Eng.,
S.I. Vasilevskaya, Post graduate student
(Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx Avenue, 630073, Novosibirsk)

Electrolyte choice for electro-chemical treatment of small diameter holes in copper

The problems of electrolyte choice for the electro-chemical broaching small holes in copper are considered. It is defined that treatment productivity increase is achieved with the use of electrolytes with maximum values of specific electric conductivity and the yield of material treated on current. There are shown the ways for the increase of productivity and accuracy of treatment with a fixed tool-cathode. It is shown that the increase of treatment accuracy is ensured at electro-chemical broaching in passivating electrolytes with minimum dissipative capacity.

An electro-chemical dimension treatment according to the circuit of fixed tool-cathode results in considerable loss of accuracy in the hole obtained at the expense of taper formation. To eliminated such a drawback it is necessary to carry out a stabilization of an interelectrode gap using a scheme with the motion of one of electrodes. It is determined that for an electro-chemical broaching of small diameter holes it is necessary to use a hollow tool-cathode with electrolyte supply through it under pressure the value of which ensures the formation of a reverse flow along a tool which increases the localization of an anode dissolution process minimizing the corrosion of material under treatment at the input in a hole.

Keywords: electro-chemical treatment; inter-electrode gap; anode dissolution; specific electric conductivity; kinematic viscosity; metal yield on current; electrolyte; polarization investigations.

Необходимость совершенствования существующих методов электрофизической обработки связана, с одной стороны, с появлением новых материалов, обработка которых затруднена или не возможна при использовании традиционных методов механической обработки [1, 2], а с другой, с возникновением сложных технических задач по формообразованию поверхностей.

Последнее является весьма актуальным при создании микрообъектов, когда размеры обрабатываемых поверхностей составляют доли миллиметра. Для решения подобного рода технологических задач широкое распространение получила электрохимическая размерная обработка (ЭХРО), основанная на локальном анодном растворении металла при высокой плотности тока в условиях проточного элек-

тролита. Достоинства ЭХРО, обеспечивающие обработку токопроводящих металлов и сплавов не зависимо от их химического состава и структурного состояния, а, следовательно, и механических свойств, делают ее зачастую единственно возможной.

Существует значительное количество исследований, направленных на оптимизацию технологических параметров ЭХРО для достижения требуемых показателей точности и качества обрабатываемых поверхностей и высокой производительности процесса. Поиск новых решений по развитию электрофизических технологий привел к созданию комбинированных процессов, основанных на сочетании анодного растворения металла с другими физическими процессами – механическим резанием [3], лазерным излучением [4], эрозионными разрядами [5].

Важным условием для эффективной реализации процесса электрохимической обработки является правильный выбор электролита. Это связано с тем, что электролит в условиях формообразования выполняет несколько функций. Так электролит является рабочей средой, в которой содержатся токопроводящие ионы, обеспечивающие процесс анодного растворения обрабатываемого материала. В тоже время прокачка электролита через межэлектродный зазор создает гидродинамические условия для выноса из зоны обработки продуктов анодного растворения, температурной стабилизации процесса.

Роль данных процессов усиливается при работе на малых межэлектродных зазорах, характерных для ЭХРО, в общем, и при обработке малых отверстий, в частности.

В настоящей работе описываются подходы по выбору составов электролита и их параметров для электрохимической размерной обработки малых отверстий (до 1 мм) в меди.

Теоретическое обоснование выбора электролита. Электролиты, используемые в электрохимической размерной обработке, характеризуются следующими параметрами [6]:

- растворимостью компонентов раствора, обеспечивающей создание необходимой концентрации электролита;
- степенью диссоциации для всех возможных комбинаций исходных катионов и анионов, определяющей разделение электролитов на слабые и сильные;
- кинематическая (динамическая) вязкость раствора, определяющая гидродинамические условия его движения в межэлектродном зазоре;

- стабильность электролита, характеризующая сохранение его свойств при обработке.

Для процесса электрохимической размерной обработки необходимо, чтобы все электрохимические реакции были обратимыми между анионами и катионами электролита, на которые самопроизвольно распадаются молекулы электролита согласно теории электролитической диссоциации. Для реализации процесса электрохимического формообразования необходимо, чтобы:

- анионный состав электролита обеспечивал эффективное протекание на обрабатываемом материале реакции анодного растворения, что достигается при содержании в электролите анионов, обладающих высоким значением положительного стандартного потенциала ($+φ_0$). К таким анионам относятся NO_3^- ($φ_0 = 0,83$ В), Cl^- ($φ_0 = 1,36$ В), OH^- ($φ_0 = 1,7$ В), SO_4^{2-} ($φ_0 = 2,01$ В) [7];

- катионный состав электролита не должен приводить к осаждению металлических катионов на поверхности катода-инструмента, изменяя его форму и геометрические размеры. Данное условие соблюдается при наибольших значениях отрицательного стандартного потенциала ($-φ_0$) катионов раствора, например, Na^+ ($φ_0 = -2,71$ В), K^+ ($φ_0 = -2,92$ В) [7].

Из рассмотренного списка анионов и катионов возможна организация различных типов электролитов, которые представляют кислоты (HCl , HNO_3), щелочи ($NaOH$, KOH) и растворы нейтральных солей ($NaNO_3$, KNO_3 , $NaCl$, KCl , Na_2SO_4 , K_2SO_4).

Перечисленные растворы электролитов удовлетворяют условиям электрохимической обработки, реализующим эффективное протекание анодного растворения обрабатываемого материала и не допускающим осаждение металлических катионов раствора на катод-инструменте. Практика электрохимической обработки свидетельствует о предпочтении водных электролитов нейтральных солей. Это вызвано тем, что использование кислотных и щелочных растворов сопряжено с риском отравления и ожогов персонала, их низкой пожаро- и взрывобезопасностью, а также коррозионным воздействием на технологическое оборудование.

Следует отметить, что выбранные нейтральные соли обладают высокой степенью растворимости в воде, обеспечивая возможность получения растворов в широком диапазоне концентраций, а значительная степень диссоциации данных электролита позволяет

рассматривать их как сильные электролиты.

В общем случае при выборе электролитов предпочтение отдается электролитам с максимальной удельной электропроводностью, обеспечивающей минимизацию омических потерь в межэлектродном зазоре. В свою очередь значение удельной электропроводности

зависит как от температуры электролита, так и от степени его диссоциации, концентрации и подвижности ионов.

В табл. 1 приведены значения удельной электропроводности от концентрации для представителей группы электролитов нейтральных солей [7].

1. Удельная электропроводность электролитов

Удельная электропроводность, χ_e , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	Электролиты								
	NaCl			NaNO ₃			Na ₂ SO ₄		
	5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	30 %	5 %	10 %	15 %
	0,067	0,121	0,164	0,044	0,078	0,160	0,041	0,069	0,089

Представленные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что для всех рассматриваемых электролитов увеличение их концентрации приводит к росту удельной электропроводности, что объясняется увеличением числа ионов в единице объема. Однако, при достижении определенных значений концентрации раствора, удельная электропроводность снижается в сильных электролитах из-за торможения ионов за счет релаксационного и электрофоретического эффекта, в слабых – из-за уменьшения степени диссоциации раствора. Увеличение же электропроводности с ростом температуры связано со снижением коэффициента трения ионов [8].

Гидродинамические условия движения электролита в межэлектродном зазоре, влияющие на диффузионную стадию электродной реакции и, соответственно, определяющие значение анодного потенциала и величину выхода металла по току, зависят от скорости потока электролита, которая, в свою очередь, определяется кинематической вязкостью раствора. Гидродинамический режим должен обеспечивать как обновление электролита в рабочей зоне, так и эвакуацию продук-

тов растворения из нее.

При ЭХРО необходимо создание оптимальных гидродинамических условий, при которых осуществляется полный и своевременный вынос продуктов электрохимических реакций из межэлектродного зазора и достигается минимизация диффузионных ограничений, связанных с образованием окисных пленок на анодной поверхности.

Оптимальный гидродинамический режим количественно характеризуется числом Рейнольдса, который при прочих равных условиях определяется скоростью потока электролита и величиной межэлектродного зазора. Превышение скорости, при которой формируются оптимальные гидродинамические условия, приводит к переходу к кавитационному режиму, вызывающему уменьшение контактной площади электролита с электродами, увеличению омического сопротивления электролита в межэлектродном зазоре и, как результат, снижению интенсивности анодного растворения.

Рассмотренные выше составы электролитов водных растворов нейтральных солей обладают низким значением кинематической вязкости (табл. 2) [9].

2. Кинематическая вязкость электролитов

Кинематическая вязкость, сСт	Электролиты						
	NaCl			NaNO ₃		Na ₂ SO ₄	
	5 %	10 %	15 %	20 %	10 %	20 %	15 %
	1,05	1,11	1,17	1,34	1,02	1,10	1,54

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что кинематическая вязкость электролита зависит от вида растворяемого компонента и его концентрации. Увеличение последней приводит к определенному повышению его кинематической вязкости. Изменение

данного параметра в установленном диапазоне при использовании электролитов разной концентрации не потребует корректировки гидродинамического режима, обеспечивающего оптимальные условия процесса обработки.

Методика экспериментального исследования

В соответствии с теоретическими предположениями, основанными на анализе основных характеристик электролитов, определяющих процессы анодного растворения токопроводящих металлов, для экспериментальных исследований были выбраны водные растворы нейтральных солей: натрий хлористый (NaCl) – ГОСТ 4233–77, натрий азотнокислый (NaNO₃) – ГОСТ 828–77, натрий сернокислый (Na₂SO₄) – ГОСТ 4166–76.

В качестве обрабатываемого материала использовалась медь марки М1 ГОСТ 859–2001.

Оценка особенностей анодного растворения обрабатываемого материала в выбранных электролитах проводилась на базе поляризационных исследований с использованием потенциодинамического и потенциостатического методов.

Технологические эксперименты по обработке малых отверстий неподвижным катодом-инструментом проводились на экспериментальной установке, конструкция которой представлены в работе [10]. Количественная оценка результатов электрохимической обработки отверстий проводилась с помощью измерительных устройств на базе индикатора многооборотного с ценой деления 0,001 мм (ГОСТ 9696 –82) и измерительного микроскопа Nikon MM – 400.

Результаты и обсуждение

Поляризационные исследования с использованием потенциодинамического метода позволяют выявить особенности анодного поведения того или иного материала в условиях электрохимического растворения в различных электролитах. На рис. 1 представлены поляризационные кривые, полученные для меди, которые свидетельствуют о том, что все выбранные электролиты нейтральных солей являются пассивирующими для данного материала.

Этот факт подтверждается наличием областей пассивации в определенных диапазонах потенциала и для всех значений концентрации электролитов. Для всех электролитов область активного анодного растворения лежит в диапазоне потенциалов до 0,5...1,0 В. При повышении потенциала наступает стадия пассивации, характеризующаяся снижением плотности тока с ростом потенциала. Дальнейший рост потенциала приводит к стабилизации плотности тока.

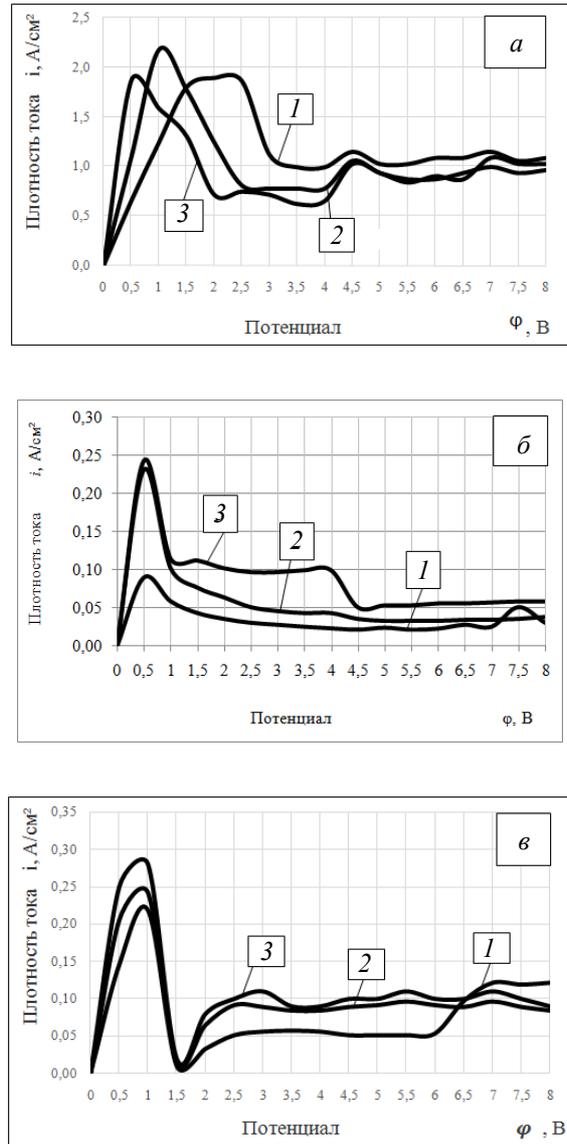


Рис. 1. Поляризационные кривые, полученные для меди М1 при помощи потенциодинамического метода:

а – в электролите азотнокислого натрия (NaNO₃); б – в электролите хлористого натрия (NaCl); в – в электролите сернокислого натрия (Na₂SO₄) при концентрациях: 1 – 5 %; 2 – 10 %; 3 – 15 %

Принимая во внимание то, что при потенциодинамических исследованиях изучение анодного поведения материала осуществляется в неподвижном электролите, наличие области пассивации объясняется формированием окисных пленок на аноде, что приводит к снижению скорости анодного растворения.

Действие механизма пассивации за счет образования окисных пленок подтверждают потенциостатические исследования при фиксированных значениях потенциала (φ = 2; 4; 6; 8 В) (рис. 2).

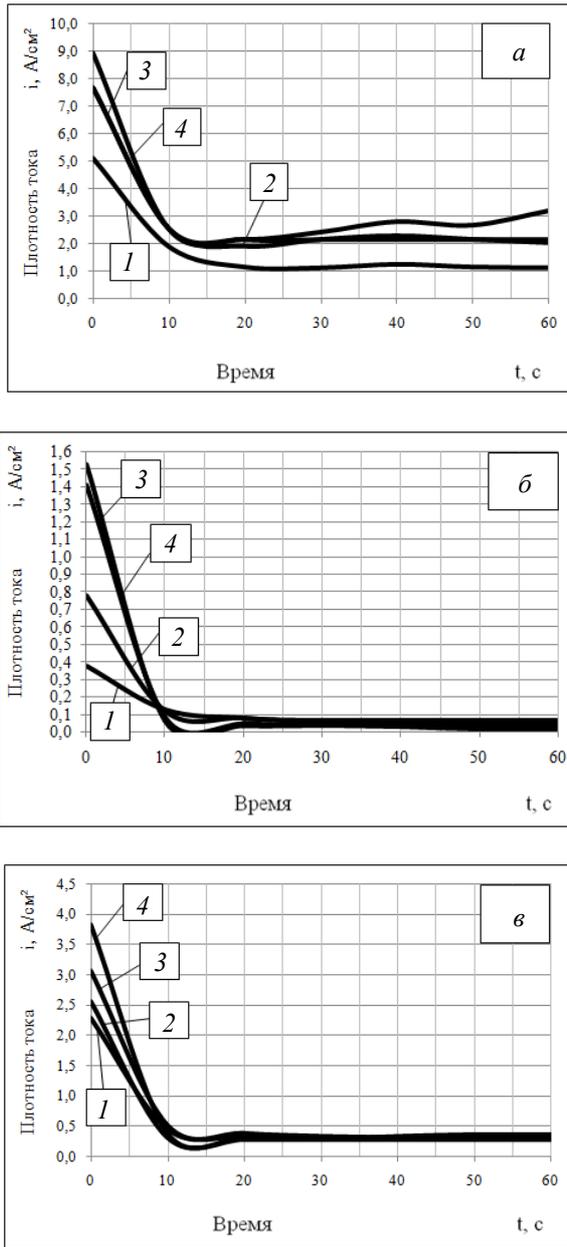


Рис. 2. Поляризационные кривые, полученные для меди М1 при помощи потенциостатического метода в 5 %-ных электролитах:

а – азотнокислого натрия (NaNO₃); *б* – хлористого натрия (NaCl); *в* – сернокислого натрия (Na₂SO₄) при потенциалах: 1 – 2 В; 2 – 4 В; 3 – 6 В; 4 – 8 В

Данные исследования направлены на фиксирование токов включения, когда в первоначальный момент обработки на предварительно зачищенной поверхности анода отсутствуют какие-либо окисные пленки. Поэтому значения плотностей тока в начальный момент во всем диапазоне потенциалов соответствуют области активного растворения, которые сравнительно превышают значения для соответствующих величин потенциала на потенциодинамических кривых. Из рис. 2 видно,

что после включения по ходу процесса происходит падение плотности тока, что свидетельствует о развитии процесса пассивации.

Совместный анализ результатов, представленных на рис. 1 и 2, свидетельствует о том, что значения плотности тока на потенциодинамических и потенциостатических кривых для электролита NaNO₃, значительно выше, чем для Na₂SO₄ и NaCl. Однако производительность процесса электрохимической обработки определяется не абсолютным значением плотности тока, а той ее долей, которая затрачивается на основную реакцию – анодное растворение.

Количественным показателем обрабатываемости металлов в том или ином электролите является выход по току – как отношение плотности тока, расходуемой на основную реакцию (анодное растворение) к общей плотности тока, протекающего через электрод. Так анодный выход по току при обработке меди марки М1 в 25 % NaCl составляет – 98 %; 30 % NaNO₃ – 66 %; 15 % Na₂SO₄ – 61 % [6].

Представленные данные свидетельствуют о том, что только 2 % плотности тока при обработке меди в растворе NaCl расходуется на побочные реакции, не связанные с удалением обрабатываемого материала. Также следует учитывать тот факт, что выход металла по току при обработке в растворах NaCl практически не зависит от его концентрации (в исследуемом диапазоне) и реализуемой плотности тока. В тоже время уменьшение концентрации раствора NaNO₃ с 30 % до 5 % приводит к снижению выхода по току с 66 % до 20 % при общей плотности тока 20 А/см² [11].

Сопоставляя результаты поляризационных исследований и данных по обрабатываемости меди в рассматриваемых электролитах можно предложить возможные варианты ее обработки в условиях технологического эксперимента. Независимость выхода по току для электролита NaCl от его концентрации, позволяет производить обработку в 5 %-ных растворах. Для применения водных растворов NaNO₃ и Na₂SO₄ необходимо увеличение их концентрации для повышения эффективности обработки.

Оценка производительности при электрохимической обработке в различных электролитах производилась при прошивке отверстий в меди неподвижным полым катодом-инструментом, в качестве которого использовалась медицинская игла с соотношением внутреннего и наружного диаметров 0,26 мм/0,46 мм. Подача электролита в зону обработки осуществлялась через отверстие инструмента

под давлением $P = 0,3$ МПа, при котором обеспечивалось своевременное и полное удаление продуктов анодного растворения, с одной стороны, с другой стороны – формирование отраженной струи от обрабатываемой поверхности в виде обратного потока, направленного вдоль катода-инструмента (рис. 3, а).

Формирование подобной геометрии отраженного потока в условиях увеличивающегося по мере обработки межэлектродного зазора обеспечивает максимальную локализацию электрохимической обработки, не допуская растворение материала на периферии отверстия.

Снижение давления прокачки электролита через катод-инструмент приводит к уменьшению скорости потока, что при определенном давлении (для данного типоразмера иглы $P < 0,1$ МПа) не обеспечивает формирование отраженного потока и весь электролит, выходящий из зоны обработки, растекается по поверхности анода, снижая тем самым локализацию процесса анодного растворения (рис. 3, б). Это приводит к растворению материала на входе отверстия, снижая точность его формообразования. Снижение скорости потока также ухудшает сменяемость электролита в зоне обработки, что может привести к дестабилизации его свойств.

Обработка производилась при напряжении на электродах $U = 10$ В, первоначальное значение межэлектродного зазора составляло 0,1 мм, время обработки – 5 мин.

На рис. 4 представлены результаты обработки отверстия в меди полым катодом-инструментом при использовании различных электролитов. Геометрия поперечного сечения отверстия при электрохимической обработке в 5 %-ном растворе NaCl показана на рис. 4, а. За установленное время обработки объем удаленного материала составил 0,11 мм³, при этом наблюдается значительное отклонение формы отверстия от цилиндрической.

Применение 5 %-ного раствора NaNO₃ при тех же технологических параметрах обработки позволило сформировать отверстие с меньшим искажением его формы (рис. 4, б). При обработке в данном электролите наблюдается снижение производительности до 2 раз, что объясняется более низкими значениями выхода по току и удельной электропроводности 5 %-ного раствора нитрата натрия. При этом замечено, что формирование обратного потока электролита, направленного вдоль катода-инструмента, при обработке в 5 %-ном растворе NaNO₃ происходило через 5...10 с после

его начала, в то время как в растворе 5 %-ного NaCl на это потребовалось около 1 мин.

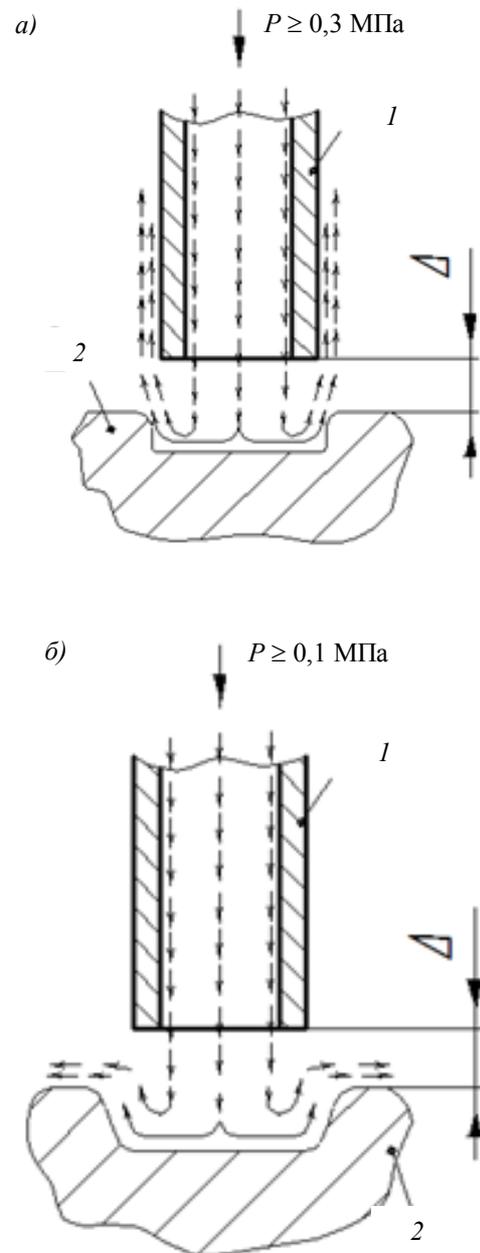


Рис. 3. Влияние давления электролита на формирование геометрии отраженного потока:
1 – катод-инструмент; 2 – анод-деталь; Δ – начальный межэлектродный зазор

Данный факт объясняется тем, что электролиты на основе нитрата натрия обладают низкой рассеивающей способностью, тем самым повышают локализацию процесса электрохимической обработки. При использовании хлорида натрия с более высокой рассеивающей способностью анодному растворению подвергается большая поверхность под катодом.

Как результат, на входе отверстия формируется конус, что не обеспечивает образование обратного потока электролита на начальной стадии обработки.

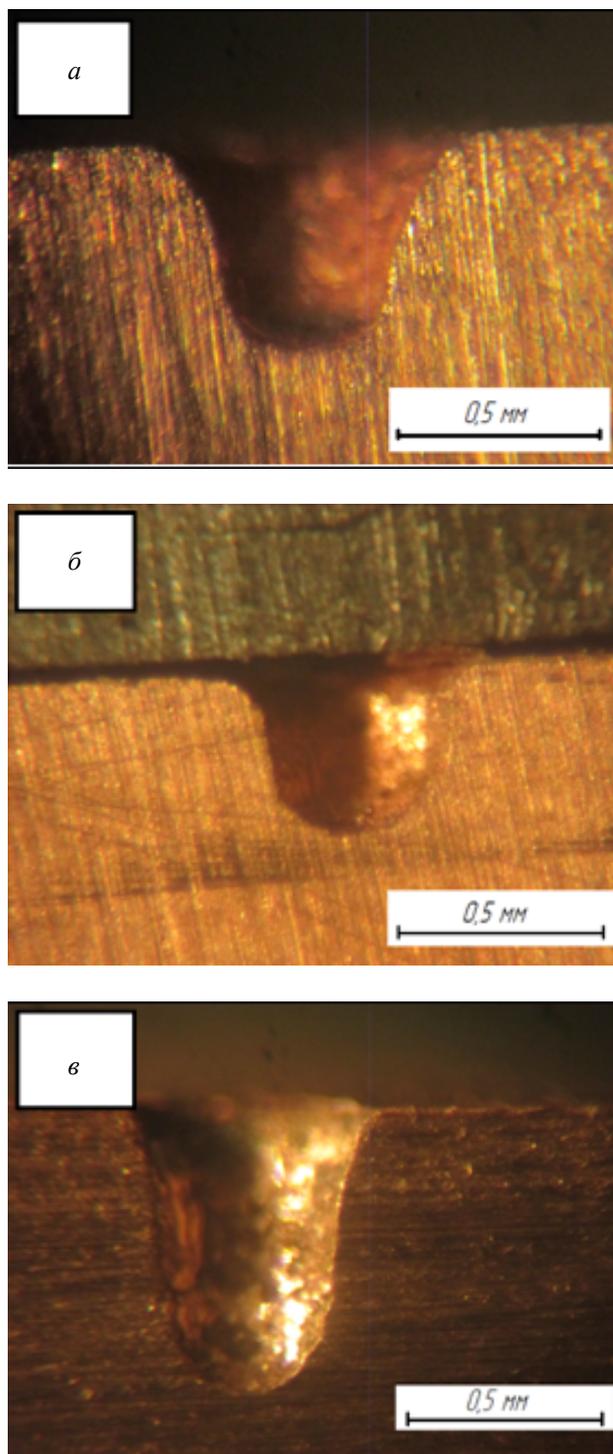


Рис. 4. Влияние состава электролита и его концентрации на объем анодного растворения и формообразование отверстия в меди при электрохимической прошивке неподвижным пористым катодом-инструментом:

a – 5 % NaCl, $V = 0,11 \text{ мм}^3$; *б* – 5 % NaNO₃, $V = 0,05 \text{ мм}^3$;
в – 30 % NaNO₃, $V = 0,13 \text{ мм}^3$

Применение в качестве электролита 30 %-ного раствора NaNO₃, обладающего большей почти в 4 раза удельной электропроводностью по сравнению с электролитом 5 %-ной концентрации, увеличило производительность обработки более чем в 2,5 раза (рис. 4, *в*). При этом объем растворенного материала превысил значение, достигнутое при обработке в 5 %-ном растворе NaCl. Это связано с ростом, как удельной электропроводности, так и значения выхода по току при повышении концентрации NaNO₃.

Низкая рассеивающая способность электролитов на основе нитрата натрия и при высокой концентрации раствора обеспечила меньше искажение формы по глубине отверстия по сравнению с обработкой в 5 % NaCl. Образование конусности отверстия по глубине объясняется схемой обработки неподвижным катодом-инструментом.

По мере анодного растворения обрабатываемого материала первоначальное значение межэлектродного зазора увеличивается, что приводит к увеличению омического сопротивления столба электролита, уменьшению плотности тока и, следовательно, к снижению эффективности обработки.

Выводы

1. Схема электрохимической прошивки отверстий неподвижным катодом-инструментом, которая характеризуется отсутствием стабилизации межэлектродного зазора, отличается простотой реализации и может быть рекомендована для получения малых отверстий длиной соизмеримой с их диаметром.

2. Для электрохимической прошивки малых отверстий необходимо использовать полый катод-инструмент с подачей электролита через него под давлением, величина которого обеспечивает формирование обратного потока вдоль инструмента, что повышает локализацию процесса анодного растворения, минимизируя растравливание обрабатываемого материала на входе в отверстие. При использовании в качестве катода-инструмента иглы с соотношением внутреннего и наружного диаметров 0,26 мм/ 0,46 мм достаточной величиной давления является 0,3 МПа.

3. Увеличение производительности обработки достигается при использовании электролитов с максимальными значениями удельной электропроводности и выхода обрабатываемого материала по току. При прошив-

ке отверстия в меди этим условием удовлетворяют водные растворы нейтральных солей 5 % NaCl и 30 % NaNO₃.

4. Повышение точности обработки обеспечивается при электрохимической прошивке в пассивирующих электролитах с минимальной рассеивающей способностью. Наиболее перспективным с этих позиций при обработке меди является водный раствор нитрата натрия.

5. Для исключения конусности обрабатываемого отверстия, особенно при значительном превышении его длины над диаметром, целесообразно реализовать схему со стабилизацией межэлектродного зазора за счет перемещения одного из электродов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Янпольский, В.В., Никитенко, М.И., Моисеенко, А.Н. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 2. – С. 3 – 5.
2. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Янпольский, В.В., Красильников, Д.Б. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2010. – № 3. – С. 3 – 7.
3. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Рахимьянов, К.Х. Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2006. – № 2. – С. 32 – 33.
4. Рахимьянов, Х.М., Журавлев, А.И., Гаар, Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2010. – № 2. – С. 135 – 144.
5. Рахимьянов, Х.М., Леонтьев, И.А., Василевская, С.И. Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2016. – № 10 (64). – С.7 – 13.
6. Мороз, И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 279 с.
7. Никольский, Б.П. Справочник химика: Том 3. Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы. Часть 2. – М.: 2013. – 517 с.
8. Кубасов, В.Л., Зарецкий, С.А. Основы электрохимии. – М.: «Химия», 1976. – 184 с.
9. Вишницкий, А.Л., Ясногородский, И.З., Григорчук, И.П. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 212 с.

10. Василевская, С.И., Макаров, В.Ф. Струйная электрохимическая микрообработка отверстий // *Сборник: Science for the Future первая ежегодная российская национальная конференция по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике*. Новосибирский государственный технический университет. – 2016. – С. 89 – 91.

11. Седыкин, Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение. 1976. – 346 с.

REFERENCES

1. Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A., Yanpolsky, V.V., Nikitenko, M.I., Moysenko, A.N. Electro-chemical dissolution of powder coatings // *Metal Machining (technology, equipment, tools)*. – 2011. – № 2. – pp. 3 – 5.
2. Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A., Yanpolsky, V.V., Krasilnikov, D.B. Electro-chemical treatment of non-tungsten hard alloys // *Metal Treatment (technology, equipment, tools)*. – 2010. – № 3. – pp. 3 – 7.
3. Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A., Rakhimyanov, K.H. Accuracy of shaping at electro-diamond slot cutting in amorphous and nano-crystalline alloys // *Metal Treatment (technology, equipment, tools)*. – 2006. – № 2. – pp. 32 – 33.
4. Rakhimyanov, Kh.M., Zhuravlyov, A.I., Gaar, N.P. Plant for investigations of electro-chemical processes under conditions of laser activation of electro-chemical dimension treatment process // *Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University*. – 2010. – № 2. – pp. 135 – 144.
5. Rakhimyanov, Kh.M., Leontiev, I.A., Vasilevskaya, S.I. Technological outlooks in combining electro-erosion and electrochemical processes in treatment of small diameter holes // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 10 (64). – pp.7 – 13.
6. Moroz, I.I. *Electrochemical Dimension Treatment of Metals*. – М.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 279.
7. Nikolsky, B.P. *Chemist's Reference Book: Vol. 3. Chemical Equilibrium and Kinetics. Solution Properties. Electrode Processes. Electrode Processes. Part 2*. – М.: 2013. – pp. 517.
8. Kubasov, V.L., Zaretsky, S.A. *Electrochemistry Fundamentals*. – М.: "Chemistry", 1976. – pp. 184.
9. Vishnitsky, A.L., Yasnogorodsky, I.Z., Grigorchuk, I.P. *Electrochemical and Electromechanical Treatment of Metals*. – L.: "Mechanical Engineering", 1971. – pp. 212.
10. Vasilevskaya, S.I., Makarov, V.F. Jet electrochemical micro-treatment of holes // *Collection: Science for the Future the 1-st Annual Russian National Conf. on Nano-technologies, Nano-materials and Micro-system engineering*. Novosibirsk State Technical University. – 2016. – pp. 89 – 91.
11. Sedykin, F.V. *Dimension Electrochemical Treatment of Parts*. – М.: Mechanical Engineering. 1976. – pp. 346

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев