

О.О. Редкозубова

ИМПУЛЬСНАЯ АНОДНО-КАТОДНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ МИКРООБРАБОТКА ПРИ НАЛИЧИИ ИЗОЛИРУЮЩИХ МАСОК¹

*Институт прикладной физики АН Республики Молдова,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD–2028, Республика Молдова*

Электрохимическая микрообработка (ЭХМО) при наличии изолирующих слоев на анодной поверхности – перспективный метод получения рисунков (форм) при изготовлении печатных плат и других изделий электронной промышленности [1]. Использование изолирующих масок на обрабатываемой поверхности с целью повышения локализации химической и электрохимической обработки металлов – известный и широко применяемый метод обработки и микрообработки поверхности. Его развитие основано на совершенствовании состава резистивных слоев и методов их нанесения, а также методов обработки поверхности (физических, химических, электрохимических). Использование электрохимических методов вместо широко применяемых в настоящее время химических позволяет существенно повысить скорость обработки, расширить возможности управления процессом посредством регулирования тока или потенциала, снизить нагрузку на окружающую среду благодаря использованию растворов простых неорганических солей при температуре окружающей среды вместо концентрированных растворов окислителей и повышенных температур обработки (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика технологий химической и электрохимической микрообработок [1]

Параметр	Химическая микрообработка (ХМО)	Электрохимическая микрообработка (ЭХМО)
Раствор	кислый или щелочной	нейтральный или разбавленный кислый / щелочной
Температура	30 – 75°C (до 150°C)*	комнатная или умеренная
Операция	с использованием масок – изолирующих слоев	с использованием масок и без них
Скорость обработки	6 – 75 мкм/мин (0,5 мкм/мин)*	по крайней мере в 10 раз выше, чем при ХМО
Проблемы, связанные с токсичностью и утилизацией отходов	высокий уровень нагрузки на окружающую среду	низкий или средний уровень нагрузки

*Значения в скобках относятся к полупроводниковым материалам.

Однако использование ЭХМО при наличии изолирующих слоев приводит к возникновению ряда проблем, основными из которых являются равномерность скорости обработки в нормальном направлении и локализация травления. Кроме того, оно сдерживается недостаточной изученностью

¹Доклад на заседании Международной школы-семинара по прикладной электрохимии и электрическим методам обработки материалов «Петровские чтения» 25 апреля 2002 года.

механизмов, управляющих микро- и макрораспределением скоростей растворения. В силу тех же причин недостаточно используются широкие возможности импульсных методов электрохимической обработки и микрообработки. Ограниченное использование электрохимических методов микрообработки при частичной изоляции анодной поверхности масками, в частности импульсных, требует развития исследований в этом направлении.

В настоящей работе представлены результаты исследований, целью которых являлось изучение импульсной анодно-катодной обработки стали в хлоридном растворе и ее влияния на локализацию процесса растворения.

Использование импульсной анодно-катодной обработки было обосновано возможным эффектом усиления перераспределения скоростей растворения в случае различия поверхностных концентраций продуктов растворения C_S при травлении в нормальном направлении (C_S^h) и в области подтравливания под изоляцией (C_S^r) из-за особенностей гидродинамики [2–4]. Следовательно, если $C_S^h \approx 0$ (не отличается или слабо отличается от объемной концентрации продуктов растворения), а $C_S^r > 0$, то за период катодного импульса электроосаждение продуктов растворения (например, Fe (II) при обработке стали) в условиях анодно-катодной обработки будет происходить в большей степени на тех участках поверхности, где C_S выше, то есть в области подтравливания под изоляцией. Эффективность подобного метода увеличения локализации была показана ранее применительно к условиям микрообработки меди в нитратных растворах при наличии толстой изоляции [5].

При подобном методе обработки и микрообработки определяющим должно быть соотношение величин пропущенного заряда в анодном и катодном импульсах (рис. 1). Очевидно, что такое соотношение должно быть больше единицы, иначе растворение не будет иметь место вовсе, но оно не должно быть и слишком высоким, так как в этом случае эффект может практически не проявляться. Влияние конкретных значений q_a/q_c (величин пропущенного заряда), плотностей тока анодного и катодного импульсов, а также их длительностей на скорость и локализацию (распределение скоростей растворения) исследовалось экспериментально, в результате чего были определены оптимальные условия применения импульсной анодно-катодной обработки при микрообработке стали в хлоридном растворе при спреерном обтекании с целью повышения локализации процесса растворения.

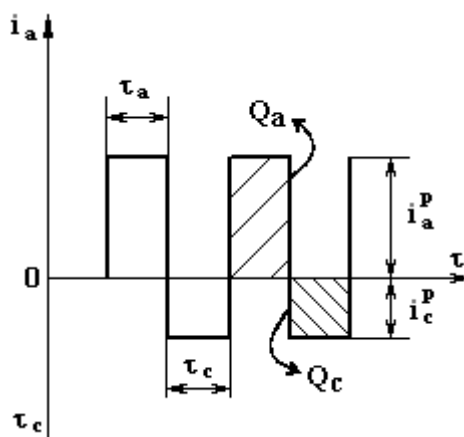


Рис. 1. Схема импульсного анодно-катодного тока: i_a^p — плотность тока в анодном импульсе; i_c^p — плотность тока в катодном импульсе; τ_a — длительность анодного импульса; τ_c — длительность катодного импульса.

Методика эксперимента

Изучение электрохимической микрообработки с применением импульсов противоположной полярности проводилось на системе малоуглеродистая сталь ($\rho = 7,9 \text{ г/см}^3$) — раствор 1М NaCl, pH = 1,0. Экспериментальное исследование осуществлялось при наличии макроскопической неоднородности на поверхности металла со следующими параметрами: $d = 393 \text{ мкм}$, $l = 753 \text{ мкм}$, $l' \sim 5 \text{ мкм}$ (где d — ширина прямоугольных отверстий активной поверхности, l — их длина, l' — толщина изоляции).

Для увеличения скорости растворения (интенсификации процесса) использовалась электродная установка с контролируемыми гидродинамическими условиями: неподвижный дисковый электрод со спреерным обтеканием. Конец спреера фиксировался на определенном расстоянии от поверхности электрода (~ 5 мм). Фиксирование расстояния осуществлялось посредством шкалы на штативе экспериментальной установки. С помощью центробежного насоса электролит прокачивался через спреер (рис. 2). В качестве источника тока (как постоянного, так и импульсного) использовался потенциостат ПИ-50-1.1 с программатором ПР-8. Параметры формы (глубина, подтравливание) определялись с помощью вертикального металлографического микроскопа МИМ-7 и профилографа-профилометра МЕ-10. Для определения величины пропущенного заряда применялся кулонометр ИРТ-1, а для измерения электропроводности – кондуктометр КЭЛ-1М2. С помощью микроскопа NEOFOT (Германия) были сделаны микрофотографии обработанной поверхности.

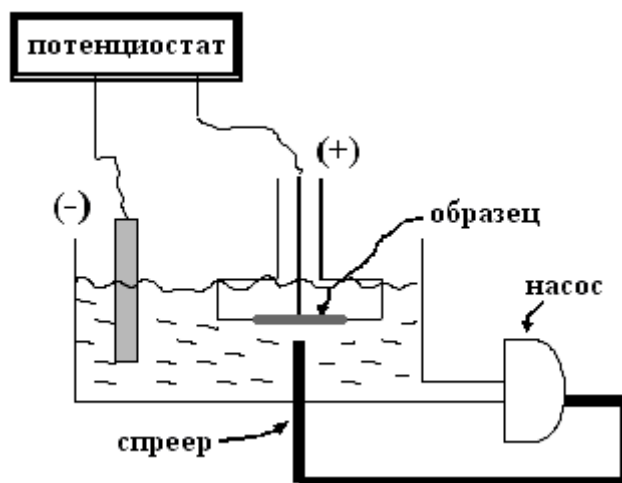


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Первоначально для изучения системы малоуглеродистая сталь – 1М NaCl, pH = 1,0 были проведены эксперименты при постоянном токе. Растворение стали при наличии изолирующей маски в условиях ЭХМО постоянным током осуществлялось на одиночных отверстиях ($S_a = 0,003 \text{ см}^2$) и на серии из 16 отверстий ($S_a = 0,048 \text{ см}^2$) при скорости течения электролита через спреер $b = 1,2 \text{ л/мин}$, $T = 25^\circ\text{C}$ в гальваностатических условиях ($I = \text{const}$). При этом средняя начальная плотность тока i_{avg}^0 изменялась в ряду $0,5\text{--}20 \text{ А/см}^2$, а плотность пропущенного заряда Q_a варьировалась от 120 до 583 Кл/см^2 .

Импульсная анодно-катодная обработка малоуглеродистой стали проводилась на одиночных отверстиях ($S_a = 0,003 \text{ см}^2$) в растворе 1М NaCl, pH = 1,0 при $b = 1,2 \text{ л/мин}$, $i_a^P = 9\text{--}20 \text{ А/см}^2$, $i_c^P = 0\text{--}10 \text{ А/см}^2$, $\tau_a = \tau_c = 0,05\text{--}0,2 \text{ с}$, $Q_a = 83\text{--}500 \text{ Кл/см}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$.

Перед обработкой электроды выдерживались в растворе $\text{FeCl}_3 \sim 1 \text{ мин}$ для активации поверхности. Затем образцы промывались дистиллированной водой, высушивались фильтровальной бумагой и взвешивались. После обработки образцы снова промывались дистиллированной водой, высушивались фильтровальной бумагой и взвешивались для определения выхода по току (η). Затем с поверхности образцов удалялась изоляция (для этого образцы выдерживались в горячем растворе щелочи).

После удаления изоляции проводились измерения глубины травления h и подтравливания под изоляцией U с помощью металлографического микроскопа, определялся фактор травления $EF = h/U$. По полученным результатам строились зависимости EF от плотности тока i_{avg}^0 .

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных экспериментов показали, что при увеличении начальной плотности тока для определенных условий происходит значительное снижение подтравливания под изоляцией и увеличение глубины травления. Вследствие этого растет и локализация процесса растворения, харак-

теризующаяся величиной фактора травления EF (рис. 3). Из графика видно, что максимальная локализация для одиночных и серии отверстий наблюдается в области, близкой к анодной предельной плотности тока i_l^0 , определяемой достижением концентрации насыщения продуктов растворения в данном растворе. Как показано в [6], для исследованной электрохимической системы (Fe – 1M NaCl) в условиях вращающегося дискового электрода (ВДЭ) $i_l^0 / \sqrt{\omega} = 0,44 \text{ A}\cdot\text{c}^{1/2}/\text{cm}^2$ (ω – частота вращения ВДЭ). Расчет по формулам, представленным в [7–10], показывает, что i_l^0 для использованных гидродинамических условий (спреерное обтекание со скоростью 1,2 л/мин) составляет $10 \text{ A}/\text{cm}^2$.

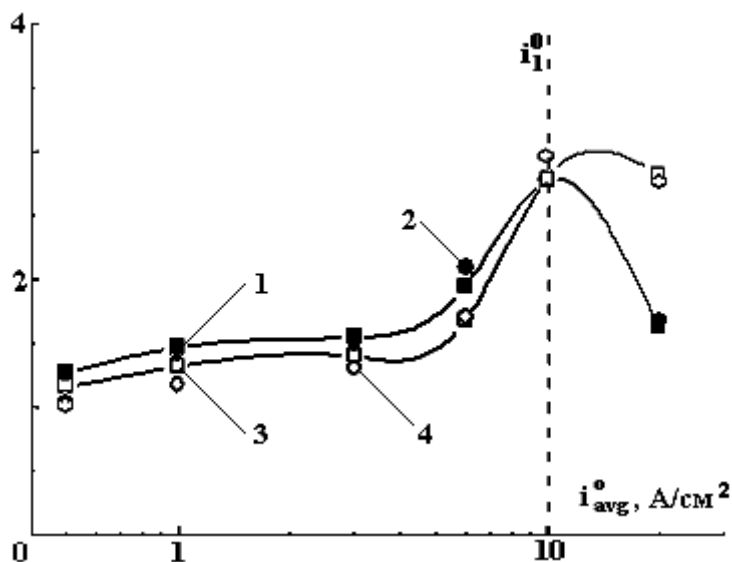


Рис. 3. Зависимость фактора травления EF^d (1, 3) и EF^l (2, 4) от начальной плотности тока i_{avg}^0 при ЭХМО стали в 1M NaCl, pH = 1,0 при $Q_a = 333 \text{ Кл}/\text{cm}^2$ и $V_h = 1,2 \text{ л}/\text{мин}$ (одиночные (1, 2) и серия (3, 4) отверстий).

При низких плотностях тока ($0,5 \text{ A}/\text{cm}^2$) растворение практически однородно – локализация растворения мала, $EF \sim 1$. В области предельных токов ($\sim 10 \text{ A}/\text{cm}^2$) он возрастает до ~ 3 . При повышении плотности тока выше предельной фактор травления снова снижается, причем в меньшей степени для серии отверстий. При достижении предельной анодной плотности тока скорость растворения полностью контролируется ионным массопереносом, а замкнутые вихри, образующиеся в области подтравливания под изоляцией [4], затрудняют вынос продуктов растворения из обрабатываемой полости. В этих условиях возрастает сопротивление переносу именно в области подтравливания. Необходимо также отметить, что в области плотностей тока, превышающих предельную плотность тока, происходит снижение выхода по току до 70%, что говорит о переходе к диффузионному контролю реакции.

На рис. 4 представлены микрофотографии полученных поверхностей, которые также показывают, как изменяется локализация травления с ростом плотности тока: увеличение плотности тока до определенного предела, обусловленного гидродинамическими условиями, приводит как к повышению локализации, что уже отмечалось ранее, так и к увеличению скорости растворения. Другими словами, высокоскоростное растворение – это путь повышения локализации процесса. Однако увеличение начальной плотности тока имеет свой предел, обусловленный достижением предельной анодной плотности тока. А следовательно, имеет свой предел и увеличение локализации процесса растворения при данных гидродинамических условиях.

Наличие замкнутых вихрей в области подтравливания под изоляцией и, как следствие, накопление продуктов растворения в зоне обработки, как уже отмечалось выше, может быть эффективно использовано для повышения локализации растворения применением импульсной анодно-катодной обработки с определенными параметрами анодных и катодных импульсов.

Результаты, полученные при использовании анодно-катодной микрообработки, показывают, что при наличии катодной составляющей электроосаждение железа наблюдается как в области подтравливания под изоляцией, так и в нормальном направлении, где оно, однако, для приведенных

выше условий анодно-катодной обработки менее интенсивно. Так, по сравнению с обработкой при постоянном токе, проведенной в аналогичных условиях, подтравливание под изоляцией снижается более чем в 2 раза, а глубина травления \sim в 1,4 раза. При этом локализация процесса растворения растет и на малых глубинах увеличивается почти в 2 раза, а фактор травления достигает значения ~ 6 (рис. 5, табл. 2). Однако скорость растворения при этом падает за счет уменьшения глубины травления по сравнению с электрохимической микрообработкой (ЭХМО) при постоянном токе (с 103 до 66 мкм/мин).

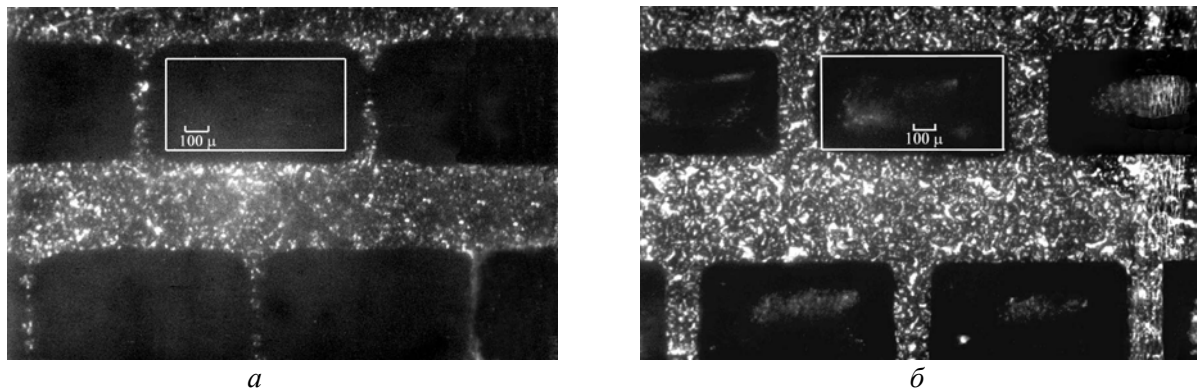


Рис. 4. Микрофотографии поверхности стали, обработанной при ЭХМО в 1М NaCl, pH = 1,0 при $Q_a = 333 \text{ Кл/см}^2$: а – $i_{avg}^0 = 0,5 \text{ А/см}^2$, $h = 81 \text{ мкм}$, $U_d = 68 \text{ мкм}$, $U_l = 76 \text{ мкм}$, $EF^d = 1,20$; $EF^l = 1,08$; $V_h = 7,3 \text{ мкм/мин}$; б – $i_{avg}^0 = 20 \text{ А/см}^2$, $h = 82 \text{ мкм}$, $U_d = 31 \text{ мкм}$, $U_l = 32 \text{ мкм}$, $EF^d = 2,74$; $EF^l = 2,64$; $V_h = 293 \text{ мкм/мин}$. Белые прямоугольники – исходные отверстия.

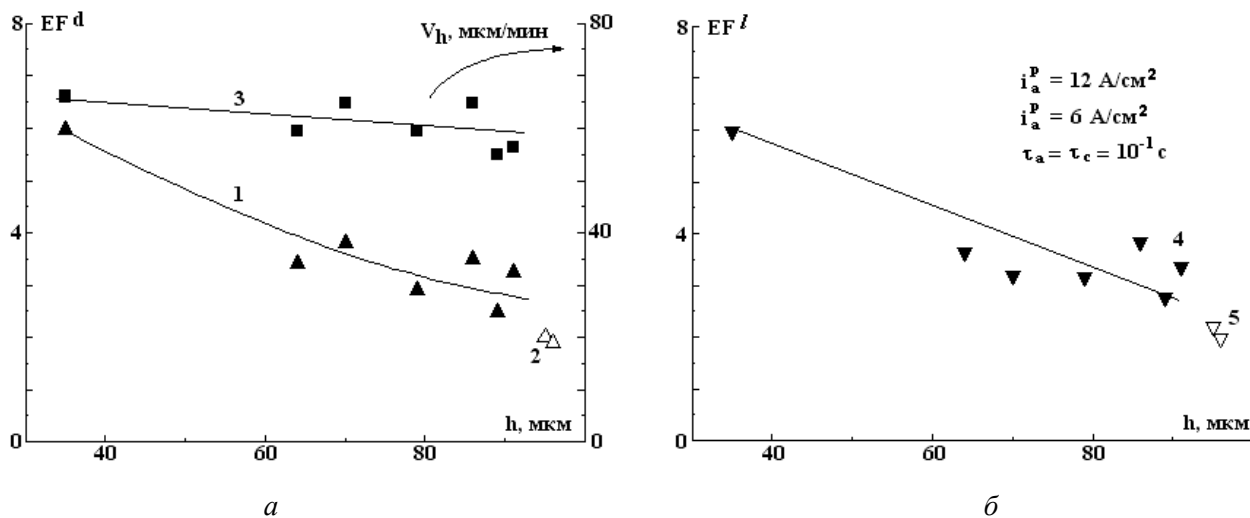


Рис. 5. Зависимость фактора травления EF^d (1), EF^l (4) и скорости растворения V_h (3) от глубины травления h при анодно-катодной обработке стали в 1М NaCl, pH = 1,0 $i_a^p = 12 \text{ А/см}^2$, $i_c^p = 6 \text{ А/см}^2$, $\tau_a = \tau_c = 10^{-1} \text{ с}$ (большие одиночные отверстия) и при ЭХМО стали постоянным током в тех же условиях ($i_{avg}^0 = 6 \text{ А/см}^2$) – EF^d (2), EF^l (5).

Увеличение i_c^p , как и уменьшение, приводит к уменьшению локализации ЭХМО. Увеличение длительности анодного импульса при $\tau_c = \text{const}$ также приводит к уменьшению локализации. При уменьшении длительности импульсов $\tau_a = \tau_c = 5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ значения EF падают – локализация уменьшается вследствие увеличения осаждения в нормальном направлении. При этом скорость травления снижается: при уменьшении длительности импульсов в 2 раза скорость V_h падает с ~ 63 до $\sim 42 \text{ мкм/мин}$ (при $i_c^p = 6 \text{ А/см}^2$, $Q_a = 333 \text{ Кл/см}^2$).

Исследование влияния конкретных величин соотношения пропущенного заряда в анодном и катодном импульсах, плотностей тока в анодном и катодном импульсах, а также их длительностей показало, что оптимальными условиями использования анодно-катодной обработки с целью повышения локализации процесса растворения являются следующие параметры: соотношение пропущенных зарядов в анодном и катодном импульсах ~ 2 ; средняя плотность тока в анодном импульсе близка к предельной анодной плотности тока, длительности анодного и катодного импульсов равны и составляют 0,1 с. Из полученных результатов можно заключить, что при данных геометрических и гидродинамических условиях системы оптимальными параметрами анодно-катодной обработки для получения высокой локализации являются: $i_a^P = 12 \text{ А/см}^2$, $i_c^P = 6 \text{ А/см}^2$, $\tau_a = \tau_c = 10^{-1} \text{ с}$.

Таблица 2. Анодно-катодная обработка стали в 1М NaCl, pH = 1,0 при $b = 1,2 \text{ л/мин}$, $i_a^P = 12 \text{ А/см}^2$, $\tau_a = \tau_c = 10^{-1} \text{ с}$

Q_a , Кл/см ²	i_c^P , А/см ²	h , мкм	U_d , мкм	U_b , мкм	EF^d	EF^l	V_h , мкм/мин
167	4,0	34 ± 2	20 ± 1	14 ± 4	1,69 ± 0,06	2,54 ± 0,78	64,2
	6,0	35 ± 6	7 ± 3	7 ± 3	5,96 ± 3,53	5,96 ± 3,53	66,0
333	0,1	94 ± 5	51 ± 4	45 ± 4	1,88 ± 0,16	2,11 ± 0,18	87,0
		93 ± 6	54 ± 3	46 ± 2	1,72 ± 0,08	2,04 ± 0,09	86,1
	0,5	97 ± 1	58 ± 3	53 ± 2	1,69 ± 0,05	1,85 ± 0,08	89,8
	1,0	93 ± 3	52 ± 1	51 ± 3	1,79 ± 0,04	1,84 ± 0,11	86,1
	4,0	69 ± 5	36 ± 3	36 ± 2	1,93 ± 0,18	1,93 ± 0,09	64,5
		79 ± 2	38 ± 2	33 ± 6	2,11 ± 0,07	2,45 ± 0,45	73,8
	6,0	70 ± 2	19 ± 5	22 ± 2	3,79 ± 0,85	3,17 ± 0,22	64,8
		64 ± 2	20 ± 7	18 ± 2	3,40 ± 1,09	3,62 ± 0,59	59,3
417	4,0	91 ± 2	41 ± 4	48 ± 2	2,22 ± 0,19	1,90 ± 0,07	68,4
		91 ± 2	42 ± 5	40 ± 1	2,20 ± 0,25	2,30 ± 0,05	68,4
	6,0	79 ± 3	27 ± 3	25 ± 2	2,90 ± 0,24	3,15 ± 0,18	59,4
		86 ± 2	25 ± 3	23 ± 2	3,49 ± 0,35	3,84 ± 0,35	64,7
500	4,0	92 ± 2	49 ± 3	46 ± 1	1,90 ± 0,10	2,00 ± 0,02	56,8
		95 ± 2	55 ± 1	54 ± 2	1,73 ± 0,01	1,76 ± 0,04	58,6
		97 ± 3	54 ± 3	53 ± 3	1,80 ± 0,09	1,84 ± 0,11	59,9
	6,0	89 ± 2	36 ± 6	34 ± 10	2,49 ± 0,36	2,75 ± 0,74	54,9
		91 ± 2	31 ± 11	27 ± 2	3,23 ± 1,25	3,34 ± 0,26	56,2

На рис. 6 приведена микрофотография обработанной анодно-катодными импульсами поверхности стали, демонстрирующая высокую локализацию процесса растворения.

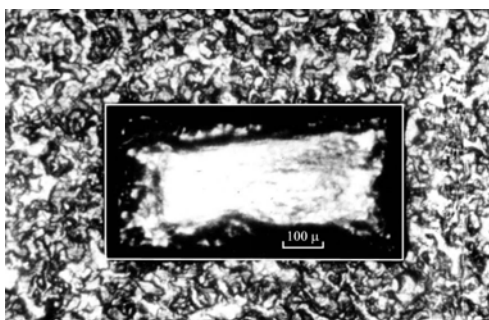


Рис. 6. Микрофотография поверхности большого одиночного отверстия, полученного при анодно-катодной обработке стали в 1М NaCl, pH = 1,0 при $i_a^P = 12 \text{ А/см}^2$, $i_c^P = 6 \text{ А/см}^2$, $\tau_a = \tau_c = 10^{-1} \text{ с}$, $Q_a = 167 \text{ Кл/см}^2$; $h = 35 \text{ мкм}$, $U_d = U_l = 7 \text{ мкм}$, $EF^d = EF^l = 5,96$; $V_h = 66 \text{ мкм/мин}$. Белый прямоугольник – исходное отверстие.

С целью увеличения локализации растворения при сохранении высокой скорости процесса был применен метод комбинированной ЭХМО. Поскольку при анодно-катодной обработке значительное увеличение локализации наблюдалось именно на малых глубинах травления, было предложено вначале формировать полость посредством использования анодно-катодных импульсов, а затем проводить растворение при постоянном токе до необходимой глубины травления.

Для проведения комбинированной обработки выбраны оптимальные условия, отмеченные выше: плотность тока в анодном импульсе – 12 А/см^2 , в катодном – 6 А/см^2 , начальная анодная плотность тока при обработке постоянным током – 6 А/см^2 , длительности анодного и катодного импульсов равны и составляют $0,1 \text{ с}$. На рис. 6 представлены зависимости факторов травления и скорости растворения от доли анодно-катодной обработки в комбинированном методе ЭХМО, а также приведено сравнение с постоянным током и импульсной анодно-катодной обработкой.

Таблица 3. Комбинированная анодно-катодная обработка стали в 1 М NaCl , $\text{pH} = 1,0$ при $b = 1,2 \text{ л/мин}$, $i_a^p = 12 \text{ А/см}^2$, $i_c^p = 6 \text{ А/см}^2$, $i_{avg}^0 = 6 \text{ А/см}^2$, $\tau_a = \tau_c = 10^{-1} \text{ с}$

Q_{ac} Кл/см ²	γ	h , МКМ	U_d , МКМ	U_l , МКМ	EF^d	EF^l	V_h МКМ/МИН
333	0,1	108 ± 3	32 ± 5	33 ± 5	$3,46 \pm 0,49$	$3,33 \pm 0,43$	122,7
		101 ± 6	30 ± 3	43 ± 3	$3,35 \pm 0,31$	$2,34 \pm 0,17$	114,8
	0,2	107 ± 2	26 ± 1	29 ± 8	$4,17 \pm 0,12$	$3,81 \pm 0,99$	118,9
	0,23	101 ± 3	27 ± 6	36 ± 7	$3,97 \pm 1,04$	$2,86 \pm 0,53$	112,2
	0,3	105 ± 9	25 ± 6	26 ± 3	$4,34 \pm 0,98$	$4,06 \pm 0,37$	114,1
		102 ± 5	31 ± 1	36 ± 3	$3,34 \pm 0,01$	$2,85 \pm 0,25$	110,9
	0,5	99 ± 3	29 ± 5	19 ± 6	$3,54 \pm 0,76$	$5,65 \pm 0,76$	101,0
		98 ± 3	26 ± 2	19 ± 6	$3,82 \pm 0,19$	$5,49 \pm 2,04$	100,0

$\gamma = \frac{q_{ac}}{q_{ac} + q_{dc}}$ – доля анодно-катодной обработки в комбинированной ЭХМО (q_{ac} – величина пропущенного анодного заряда при анодно-катодной ЭХМО; q_{dc} – величина пропущенного анодного заряда при ЭХМО постоянным током).

пропущенного анодного заряда при анодно-катодной ЭХМО; q_{dc} – величина пропущенного анодного заряда при ЭХМО постоянным током.

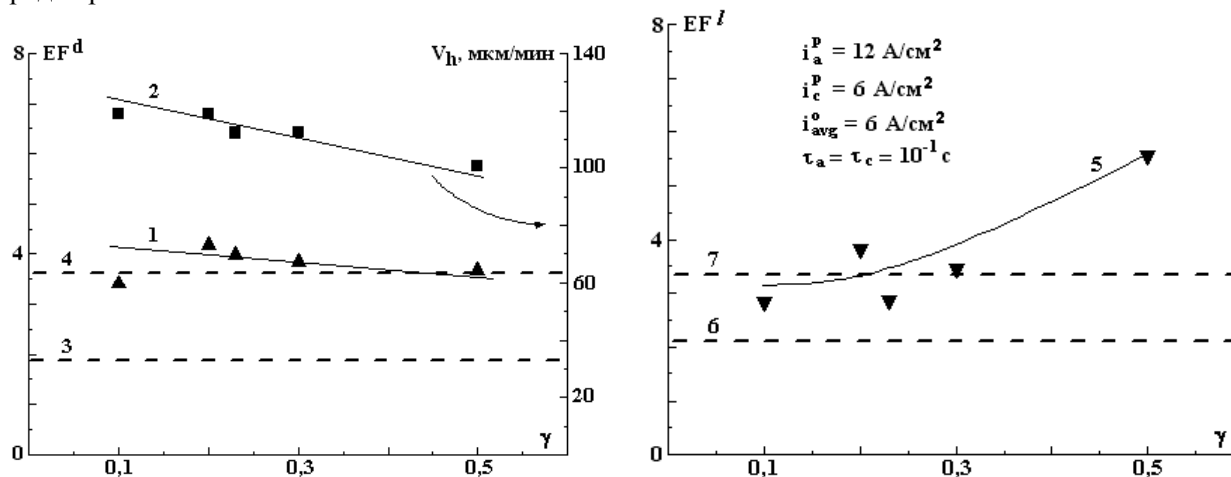


Рис. 7. Зависимость фактора травления EF^d (1), EF^l (5) и скорости растворения V_h (2) от доли анодно-катодной обработки γ при комбинированной ЭХМО стали в 1 М NaCl $\text{pH} = 1,0$ при $i_a^p = 12 \text{ А/см}^2$, $i_c^p = 6 \text{ А/см}^2$, $i_{avg}^0 = 6 \text{ А/см}^2$, $\tau_a = \tau_c = 10^{-1} \text{ с}$. Пунктирные линии представляют собой EF^d (4), EF^l (7) при анодно-катодной обработке стали в 1 М NaCl $\text{pH} = 1,0$ при $i_a^p = 12 \text{ А/см}^2$, $i_c^p = 6 \text{ А/см}^2$, $\tau_a = \tau_c = 10^{-1} \text{ с}$ и EF^d (3), EF^l (6) при ЭХМО стали постоянным током в 1 М NaCl , $\text{pH} = 1,0$ при $i_{avg}^0 = 6 \text{ А/см}^2$ (одиночные отверстия).

Из полученных результатов (табл. 3, рис. 7) следует, что подтравливание под изоляцией снижается более чем в 3 раза: при ЭХМО постоянным током подтравливание составляет ~ 50 мкм, при комбинированном методе ~ 19 мкм, в то время как глубина и скорость травления практически не изменяются (~ 96 – 98 мкм и 100 мкм/мин соответственно). Оптимальные значения доли анодно-катодной обработки $\gamma \sim 0,3 - 0,5$.

Заключение

Результаты настоящих исследований показывают, что при определенных геометрических, электрохимических и гидродинамических параметрах импульсная анодно-катодная обработка может быть использована для повышения локализации растворения. Предложен метод комбинированной обработки, который обеспечивает возможность увеличения локализации растворения при сохранении высокой скорости процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Datta M., Romankiw L.T.* Application of Chemical and Electrochemical Micromachining in the Electronics Industry // J. Electrochem. Soc. 1989. V. 136. N 6.
2. *Alkire R., Deligianni H.* The Role of Mass Transport on Anisotropic Electrochemical Pattern Etching // J. Electrochem. Soc. 1988. V. 135. N 5.
3. *Alkire R., Deligianni H., Ju J.-B.* Effect of Fluid Flow on Convective Transport in Small Cavities // J. Electrochem. Soc. 1990. V. 137. N 3.
4. *Georgiadou M., Mohr R., Alkire R.C.* Local Mass-Transport in Two-Dimensional Cavities in Laminar Shear Flow // J. Electrochem. Soc. 2000. V. 147. N 8.
5. *Редкозубова О.О., Келоглу О.Ю., Ющенко С.П., Дикусар А.И.* Локализация растворения при больших толщинах изолирующих масок в условиях электрохимической микрообработки меди в нитратных растворах // Электронная обработка материалов. 1999. № 5. С. 4–19.
6. *Kuo H.C., Landolt D.* Rotating Disk Electrode Study of Anodic Dissolution of Iron in Concentrated Chloride Media // Electrochim. Acta. 1975. Vol. 20. N 5.
7. *Давыдов А.Д.* Высокоскоростное катодное и анодное электрохимическое формообразование // Итоги науки и техники. Электрохимия. М., 1989. Т. 29.
8. *Chin D.-T., Chandran R.R.* Mass Transfer to an Impinging Jet Electrode // J. Electrochem. Soc. 1981. V. 128. N 9.
9. *Chin D.-T., Tsang C.-H.* Ring Disk Electrodes with an Impinging Jet // J. Electrochem. Soc. 1978. V. 125. N 9.
10. *Плесков Ю.В., Филиновский В.Ю.* Вращающийся дисковый электрод. М., 1972.

Поступила 27.06.2002

Summary

Electrochemical micromachining (ECMM) of photoresist-patterned mild steel has been carried out in 1M NaCl pH = 1,0. It is shown that pulse anodic-cathodic micromachining (etching) results in significant increasing of the Etch Factor: $EF \sim 3,0$ at direct current and $EF \sim 6,0$ at anodic-cathodic micromachining. New combined method of machining (anodic-cathodic machining + direct current) has been applied. Due to this method it is possible to increase localization of dissolution (EF) at maintaining high rate of process.
