

СТЕПЕНЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АНОДНОГО РАСТВОРЕНИЯ МЕДИ

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор
Б.А. КРАСИЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, профессор
С.И. ВАСИЛЕВСКАЯ, аспирант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Получена 3 июля 2015
Рецензирование 17 июля 2015
Принята к печати 12 августа 2015

Рахимьянов Х.М. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kharis51@mail.ru

Приводится оценка степени локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди при электрохимической обработке (ЭХО) в условиях механической и гидродинамической активации. Показаны процессы гидродинамического воздействия струи электролита, направленной вдоль и перпендикулярно к поверхности анода и механическое обновление анода на электрохимическое растворение меди. Представлены результаты оценки степени локализации процесса растворения меди в 5 %-м KCl при гидродинамическом воздействии струи электролита, направленной перпендикулярно к поверхности анода, и при гидродинамическом воздействии струи электролита, движущейся вдоль поверхности анода, а также в условиях механического обновления обрабатываемой поверхности анода. Проведенные исследования позволили выявить характер анодного растворения меди при вышеперечисленных способах активации процесса ЭХО. Дана количественная оценка степени локализации процесса при различных способах интенсификации анодного растворения меди.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, пассивация металла, интенсификация процесса, степень локализации, медь, потенциал, плотность тока, активация поверхности.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65

Введение

Интенсивное развитие электрохимической обработки (ЭХО) металлов и сплавов привело к созданию новых технологических процессов изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов. ЭХО по сравнению с обычной обработкой резанием имеет ряд преимуществ, что обеспечивает достижение высоких показателей точности, качества обработки и производительности процесса [1–5]. ЭХО позволяет обрабатывать заготовки из высокопрочных материалов, которые трудно или практически невозможно обрабатывать другими методами.

Однако для ЭХО большого количества металлических материалов характерно явление пассивации обрабатываемой поверхности, что в

значительной мере ухудшает процесс анодного растворения [6–10]. Поэтому детальное исследование механизма пассивации анода в условиях электрохимического формообразования представляет как теоретический, так и практический интерес. Существуют различные теории для объяснения пассивного состояния металла [10, 11]. В настоящее время наиболее аргументированы взгляды, объясняющие пассивное состояние на основе пленочного механизма торможения анодного процесса растворения металла.

К настоящему времени известен ряд методов активации поверхности анода, позволяющих снизить или полностью исключить ограничения в обработке. К ним относятся: механический, гидродинамический, лазерный методы [10, 12–16].

Изучению эффективности механического обновления анодной поверхности при ЭХО различных материалов (инструментальных сталей, аморфных и нанокристаллических сплавов, различного рода покрытий) посвящены работы [12–14]. В работе [15] показана попытка применения струи электролита для снятия ограничений, связанных с образованием пассивирующих пленок на поверхности меди. В исследовании [16] дана оценка механизмов активации поверхности при ЭХО нержавеющей стали лазерным излучением. Авторами работ [10, 12, 15, 17, 18] показано, что при интенсификации анодного растворения материалов в условиях ЭХО возможно получить высокую степень локализации процесса в зоне обработки. В связи с этим целью настоящего исследования является оценка степени локализации процесса при интенсификации анодного растворения материала при ЭХО в условиях механической и гидродинамической активации.

Методика

экспериментального исследования

Основным методом изучения процесса ЭХО для оценки анодного поведения обрабатываемого материала являются поляризационные исследования, заключающиеся в определении зависимости плотности тока от потенциала [19].

В работе [12] представлены результаты поляризационных исследований ЭХО меди при механической активации анодной поверхности в водных нейтральных электролитах 5 %-го KCl, 5 %-го Na₂SO₄, 5 %-го NaCl; 15 %-го NH₄NO₃ и в кислотном электролите 5 %-го HCl. Выявлено повышение степени локализации анодного растворения меди при данном методе активации. Максимальная степень локализации $L = 73$ была достигнута при обработке в 5 %-м пассивирующем электролите хлорида калия. В связи с этим в данной работе для поляризационных исследований в условиях гидродинамической активации был выбран данный состав электролита.

В качестве обрабатываемого материала в исследованиях использована медь марки М1 ГОСТ 859–2001. Объяснение выбора указанного материала представлено авторами в работе [12, 20]. Перед каждым экспериментом исследуемую поверхность образца подготавливали согласно

методике, изложенной в работе [19, 21]. Поляризационные исследования проводились на оборудовании, описанном в работах [15, 21].

Результаты и обсуждение

Оценка степени локализации процесса осуществлялась на основании полученных поляризационных зависимостей анодного растворения в условиях механической и гидродинамической активации. Гидродинамический метод активации обрабатываемой поверхности осуществлялся по следующим схемам:

- струей, движущейся вдоль поверхности анода (рис. 1);
- струей, направленной перпендикулярно к поверхности анода (рис. 2).

Гидродинамика электролита в межэлектродном промежутке (МЭП) – один из важных факторов, определяющих результат ЭХО. Корректный подход к проблеме учета гидродинамических условий обработки является основной задачей в теории ЭХО.

Гидродинамический способ активации поверхности материала струей, движущейся вдоль поверхности анода (рис. 1), описан авторами в работах [15, 18]. В данном способе предлагалось использовать давление струи электролита для снятия ограничений, связанных с образованием пассивирующих пленок на поверхности анода. Интенсификация ЭХО осуществлялась прокачкой электролита вдоль поверхности анода через сменные втулки с каналами круглого

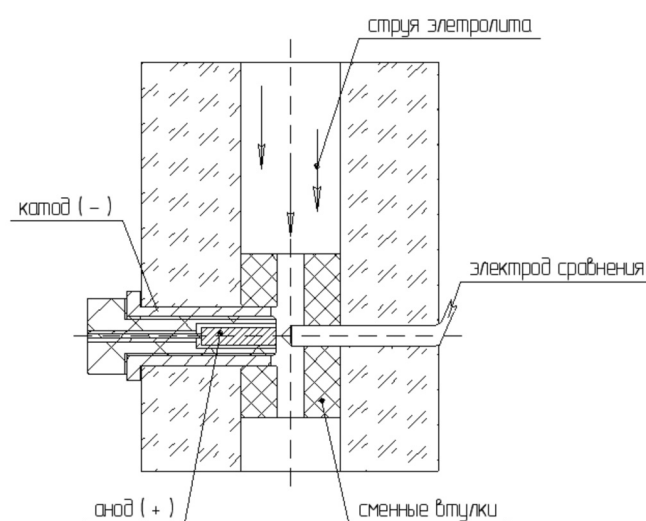


Рис. 1. Схема ячейки для ЭХО в условиях активации поверхности материала струей, движущейся вдоль поверхности анода

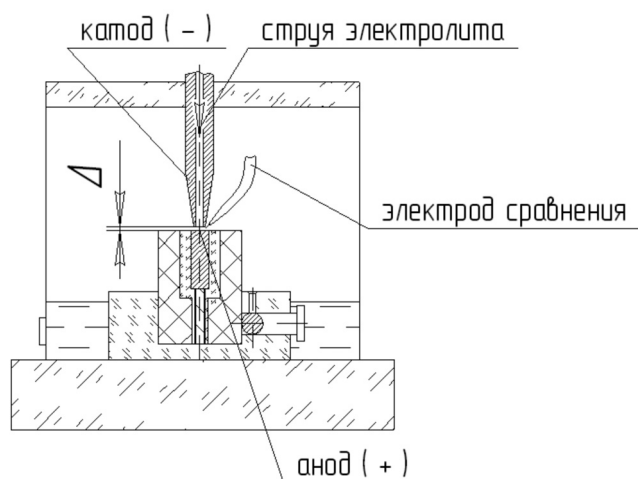


Рис. 2. Схема ячейки для ЭХО в условиях активации поверхности материала струей, направленной перпендикулярно к поверхности анода

сечения $\varnothing 8$ мм, $\varnothing 6$ мм и с каналом прямоугольного сечения 2×6 мм, что обеспечивает скорости движения струи, равные 3,6 м/с; 8,4 м/с; 16,7 м/с соответственно [15].

Способ активации поверхности материала по схеме, представленной на рис. 2, реализуется следующим образом: струя электролита под давлением по каналу катода попадает на поверхность исследуемого образца (анода). Для подачи струи электролита в зону обработки от компрессора через трубку подается сжатый воздух с заданным давлением в шар-баллон, в который предварительно заливается электролит. Электролит из шара-баллона под давлением воздуха направляется через канал катода на обрабатываемую поверхность. Величина МЭП выбиралась согласно рекомендациям работы [24] и равнялась $\Delta = 0,25 d_k$, где d_k – диаметр канала катода.

Исследование анодного поведения меди в условиях ЭХО при рассмотренных выше гидродинамических способах активации осуществлялось в диапазоне потенциалов от 0 до 8 В при различных скоростях струи.

Для сопоставления результатов ЭХО при различных методах активации были проведены исследования анодного растворения меди в условиях механической и гидродинамической активации обрабатываемой поверхности.

При механическом методе активации анодной поверхности снимались токи включения $i = f(x)$ при значении анодного потенциала от 0 до 8 В с шагом 0,5 В. Обработка полученных результатов позволила определить плотности

тока в начальный момент времени при соответствующих потенциалах и построить поляризационные зависимости при механической активации поверхности (рис. 3, кривая 1).

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены поляризационные зависимости электрохимического растворения меди в 5 %-м водном нейтральном пассивирующем электролите хлориде калия при механической и гидродинамической интенсификации процесса (рис. 3–5).

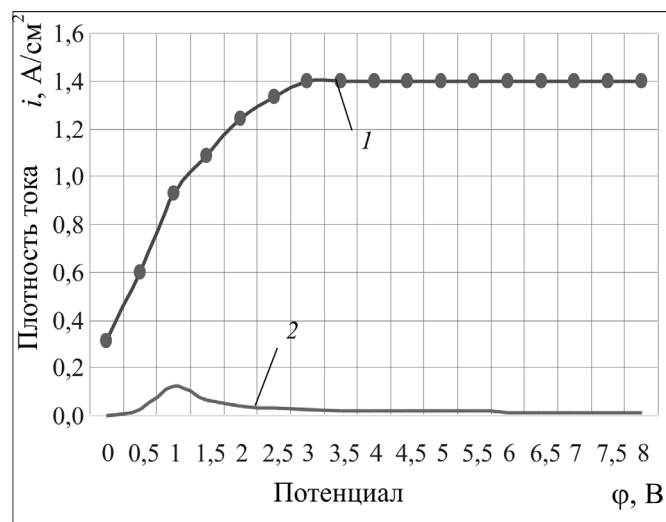


Рис. 3. Поляризационные зависимости при обработке меди в 5 %-м KCl:

1 – при механической интенсификации процесса; 2 – без интенсификации

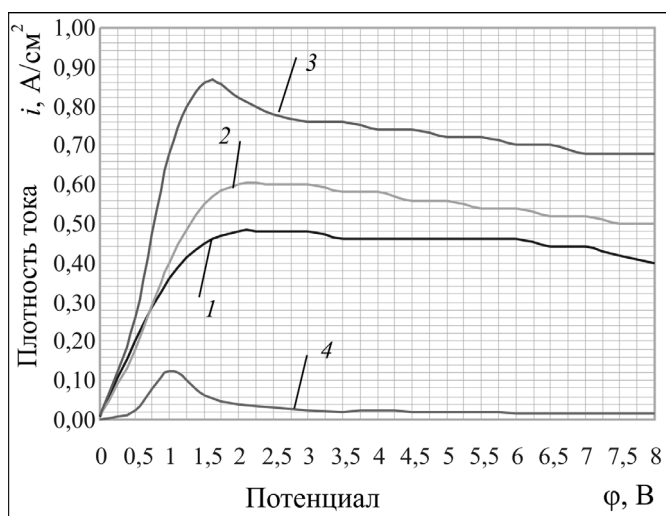


Рис. 4. Поляризационные зависимости анодного растворения меди в 5 %-м KCl при гидродинамической интенсификации процесса струей, движущейся вдоль поверхности анода со скоростями прокатки электролита:

1 – 3,6 м/с; 2 – 8,4 м/с; 3 – 16,7 м/с; 4 – без интенсификации

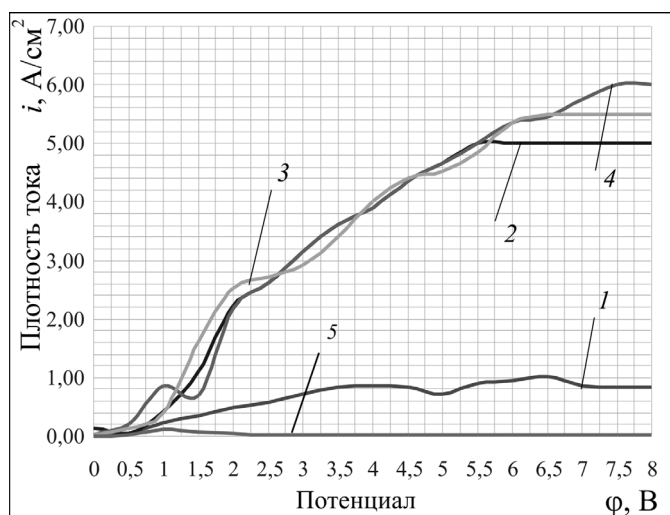


Рис. 5. Поляризационные зависимости анодного растворения меди в 5 %-м KCl при гидродинамической интенсификации процесса струей, направленной перпендикулярно к поверхности анода со скоростями прокачки электролита

1 – 9 м/с; 2 – 14 м/с; 3 – 16 м/с; 4 – 24 м/с; 5 – без интенсификации

Из рис. 3 следует, что в условиях механической интенсификации поверхности при анодном растворении материала максимальная плотность тока достигает $1,4 \text{ A/cm}^2$ при потенциалах свыше 3 В. При прокачке электролита вдоль поверхности материала (рис. 4) в диапазоне потенциалов от 0 до 1,5 В наблюдается рост плотности тока тем больший, чем выше скорость прокачки электролита, а в диапазоне потенциалов от 1,5 до 8 В поляризационные зависимости характеризуются стабилизацией плотности тока.

Это связано с тем, что при растворении металла не полностью снимаются ограничения, связанные с возникновением пассивного состояния на основе пленочного или адсорбционного механизма торможения анодного процесса.

Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что растворение обрабатываемого материала при струе, направленной перпендикулярно к поверхности анода, осуществляется во всем исследованном диапазоне потенциалов от 0 до 8 В, о чем свидетельствует непрерывное увеличение плотности тока с ростом потенциала. При этом интенсивность роста плотности тока различна при разных значениях скорости струи электролита. Если при минимальной в исследованном диапазоне скорости (рис. 5,

кривая 1), равной 9 м/с, максимальное значение плотности тока достигает $1,0 \text{ A/cm}^2$, то при повышении скорости течения струи до 14 м/с (рис. 5, кривая 2) происходит значительный рост плотности тока, достигающий 5 A/cm^2 . Дальнейшее увеличение скорости приводит к незначительному увеличению плотности тока в диапазоне максимальных значений потенциала (рис. 5, кривые 3, 4).

При интенсификации анодного растворения материала различными методами степень локализации определялась соотношением $L = i_0/i$ [12, 18, 22, 23, 25], где i_0 – плотность тока анодного растворения материала с активацией и i – плотность тока анодного растворения материала без активации.

Анализ полученных результатов (рис. 6) свидетельствует о том, что в диапазоне потенциалов от 6 до 8 В при гидродинамическом воздействии струи электролита, направленной перпендикулярно к поверхности анода, достигается максимальная степень локализации процесса $L = 350$. При механической активации поверхности анода степень локализации процесса составила $L = 90$ при ($\phi = 4 \dots 8 \text{ В}$), а при гидродинамическом воздействии струи электролита, движущейся вдоль поверхности анода в интервале потенциалов от 1,5 до 8 В, степень локализации процесса достигает $L = 45$.

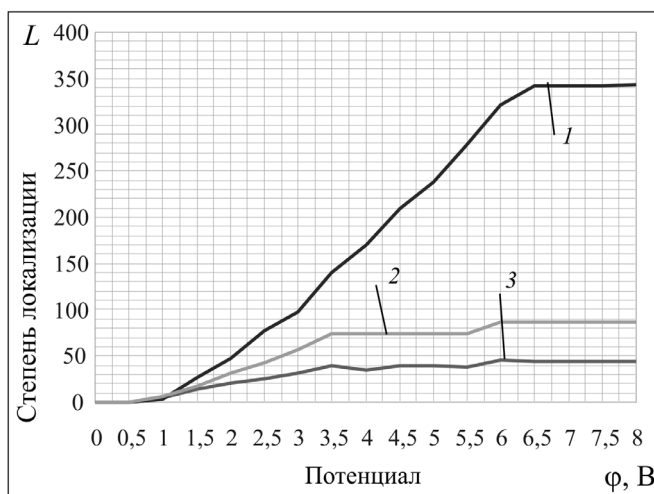


Рис. 6. Степень локализации процесса растворения меди в 5 %-м KCl:

1 – при гидродинамическом воздействии струи электролита, направленной перпендикулярно к поверхности анода; 2 – при механической активации анода; 3 – при гидродинамическом воздействии струи электролита, движущейся вдоль поверхности анода

Выводы

Проведенные исследования позволили выявить характер анодного растворения меди в 5 %-м водном нейтральном пассивирующем электролите хлорида калия при гидродинамической и механической интенсификации процесса в условиях ЭХО. Выявлено, что при гидродинамическом воздействии струи электролита, направленной перпендикулярно к поверхности анода, достигается максимальная степень локализации, равная $L = 350$. Это объясняется тем, что при ударе струи электролита о поверхность анода осуществляется удаление пассивирующих пленок и снятие диффузионных ограничений, а также происходит вынос продуктов анодного растворения из МЭП. При механической интенсификации процесса с поверхности анода удаляются пассивирующие пленки, но не устраняются диффузионные ограничения. В результате этого плотность тока снижается, что приводит к снижению степени локализации до $L = 90$. При гидродинамическом воздействии струи электролита, движущейся вдоль поверхности анода, достигается минимальное значение степени локализации $L = 45$, что объясняется недостаточным уровнем силового воздействия струи электролита для полного удаления пассивирующих пленок.

Список литературы

1. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, Д.Б. Красильников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3 (48). – С. 3–7.
2. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В. Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов НГТУ. – 2003. – № 4 (34). – С. 141–147.
3. Кабанов Б.Н., Давыдов А.Д., Кашеев В.Д. О взаимосвязи между особенностями анодного растворения металлов и точностью электрохимической размерной обработки // Размерная электрохимическая обработка деталей машин. Ч. 1. Основы теории процесса: материалы IV всесоюзной конференции. – Тула, 1975. – С. 10–14.
4. О влиянии электродных процессов на точность электрохимической размерной обработки / А.Д. Давыдов, Р.А. Мирзоев, В.Д. Кашеев, Б.Н. Кабанов // Электрохимия. – 1977. – Т. 8, № 10. – С. 1500–1502.
5. Саушкин Б.П. О динамике анодной поверхности при ЭХРО металлов в нестационарных услови-

ях // Электронная обработка материалов. – 1973. – № 5. – С. 11–14.

6. Мороз И.И., Алексеев Г.А., Водяницкий О.А. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.

7. Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

8. Румянцев Е.М., Невский О.И., Волков В.И. О влиянии поверхностных пленок на характер анодного растворения материалов при высоких плотностях тока // Электронная обработка материалов. – 1980. – № 4. – С. 17–21.

9. Кабанов Б.Н. Электрохимия металлов и адсорбция. – М.: Наука, 1976. – 104 с.

10. Давыдов А.Д., Камкин А.Н. Развитие теории анодной активации пассивных металлов // Электрохимия. – 1978. – Т. 14, № 7. – С. 979–992.

11. Крылов В.С., Давыдов А.Д. Проблемы теории электрохимического формообразования и точности размерной электрохимической обработки // Электрохимия. – 1975. – Т. 11, № 8. – С. 1155–1179.

12. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100–104.

13. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: труды Международной научно-практической конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет, Белорусский национальный технический университет; [под ред. В.Ю. Блюменштейна и Ф.И. Пантелеенко]. – Кемерово, 2009. – С. 365–368.

14. 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 (31). – С. 32–33.

15. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, А.С. Захаров, С.И. Василевская // Механики XXI века. – 2015. – № 14. – С. 112–115.

16. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Интенсификация электрохимической размерной обработки нержавеющей стали лазерным излучением // Механики XXI века. – 2008. – № 7. – С. 149–152.

17. Изменение степени локализации анодного растворения металлов при переходе к импульсным режимам электрохимической размерной обработки / А.Д. Давыдов, В.Д. Кашеев, Б.Н. Кабанов, Е.А. Хряпина // Размерная электрохимическая обработка деталей машин – ЭХО–80: тезисы докладов. – Тула, 1980. – С. 8–13.

18. Основы повышения точности электрохимического формообразования / Ю.Н. Петров, Г.Н. Корчагин, Г.Н. Зайдман, В.П. Саушкин. – Кишинев: Штиинца, 1977. – 62 с.

19. *Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыскин И.Е.* Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / под ред. Я.М. Колотыркина. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.

20. *Дикусар А.И., Доменте Г.С., Энгельгардт Г.Р.* Анодное растворение меди в концентрированных растворах нитратов при высоких плотностях тока // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 3. – С. 21–28.

21. *Василевская С.И., Герасимов Н.В.* Исследование анодного поведения меди в условиях электрохимической обработки // Наука. Промышленность. Оборона: труды XVI Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию Побе-

ды в Великой Отечественной войне, (Новосибирск, 22–24 апреля 2015 г.). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – С. 178–182.

22. *Петренко В.И., Дикусар А.И.* Факторы, определяющие рассеивающую способность электролитов при электрохимической размерной обработке металлов // Теория и практика электрохимической обработки металлов. – Кишинев: Штиинца, 1976. – С. 43–64.

23. *Давыдов А.Д.* Механизм локализации процесса анодного растворения металлов при электрохимической размерной обработке // Электрохимия. – 1975. – [Т.] 11, вып. 5. – С. 809–810.

24. *Волков К.Н.* Моделирование крупных вихрей турбулентного теплообмена в области взаимодействия круглой струи с плоской преградой // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 3. – С. 31–42.

25. *Саушкин Б.П., Зайдман Г.Н.* О рассеивающей способности электролитов, используемых в электрохимической размерной обработке // Материалы III Всесоюзной конференции по электрохимической размерной обработке металлов «Новое в электрохимической размерной обработке металлов». – Кишинев: Штиинца, 1972. – С. 45–46.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 58–65

The degree of the process localization at the intensification of anodic dissolution of copper

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

Krasilnikov B.A., Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: _167bak@ngs.ru

Vasilevskaya S.I., Ph.D. student, e-mail: Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The problem of the evaluation of the degree of process localization during the anodic dissolution intensification of copper at the electrochemical machining (ECM) under conditions of mechanical and hydrodynamic activation is considered. The processes of hydrodynamic effect of electrolyte jet directed along and perpendicular to the surface of the anode and the effect of mechanical anode stripping on electrochemical dissolution of copper are shown. The results of evaluation of the degree of localization of the copper dissolution process in 5 % KCl under hydrodynamic drag of electrolyte jets directed perpendicular to the surface of the anode during the hydrodynamic drag of the jet of electrolyte, moving along the surface of the anode, and also under condition of mechanical renovation of treated anode surface, are presented. Studies have revealed the nature of the anodic dissolution of copper at the above mentioned methods of activation of ECM process. A quantitative assessment of the degree of the process localization at different methods of intensification of anodic dissolution of copper is given. It is found that under the hydrodynamic drag of electrolyte jet directed perpendicular to the surface of the anode, the maximum degree of localization is equal to $L = 350$. When the mechanical process intensification passivation films are removed from the anode surface, but diffusion limitations does not eliminates. As a result, the current density decreases, resulting in lower degree of

localization to $L = 90$. In the hydrodynamic drag of the jet of electrolyte, moving along the surface of the anode is achieved by the minimum value of the degree of localization of $L = 45$, due to the insufficient level of force impact of the electrolyte jet to completely removal passivating films.

Keywords:

electrochemical processing, passivation of metal, intensification of the process, the degree of localization, copper, potential, current density, activation of a surface.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65

References

1. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolskii V.V., Krasil'nikov D.B. Elektrokhimicheskaya obrabotka bezvol'framovykh tverdykh splavov [Electrochemical processing of tungsten carbide]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3 (48), pp. 3–7.
2. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskii V.V. Anodnoerastvorenie bystrorezhushcheistali R6M5 i ee sostavlyayushchikh v vodnykh rastvorakh [Anodic dissolution of HSS R6M5 and its components in a water solution]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU – Transaction of scientific papers of Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 4 (34), pp. 141–147.
3. Kabanov B.N., Davydov A.D., Kashcheev V.D. [On the relationship between the characteristics of the anodic dissolution of metals and precision electrochemical machining], *Materialy IV vsesoyuznoi konferentsii "Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin". Ch. 1. Osnovy teorii protsessov* [Proceedings of the IV All-Union Conference "Dimensional Electrochemical Machining of Machine Parts". Pt. 1. Basic Theory of the Process]. Tula, 1975, pp. 10–14. (In Russian)
4. Davydov A.D., Mirzoev R.A., Kashcheev V.D., Kabanov B.N. O vliyani elektrodnykh protsessov na tochnost' elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki [Effect of electrodes processes on the accuracy of electrochemical dimensional machining]. *Elektrokhimiya – Russian Journal of Electrochemistry*, 1977, vol. 8, no. 10, pp. 1500–1502. (In Russian)
5. Saushkin B.P. O dinamike anodnoi poverkhnosti pri EKhRO metallov v nestatsionarnykh usloviyakh [The dynamics of the anode surface at electrochemical dimensional machining of metals in nonstationary conditions]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1973, no. 5, pp. 11–14. (In Russian)
6. Moroz I.I., Alekseev G.A., Vodyanitskii O.A. *Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov* [Electrochemical machining of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 208 p.
7. Popilov D.Ya. *Elektrofizicheskaya i elektrokhimicheskaya obrabotka materialov. Spravochnik* [Electrophysical and electrochemical machining of materials. Directory]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 400 p.
8. Rumyantsev E.M., Nevskii O.I., Volkov V.I. O vliyani poverkhnostnykh plenok na kharakter anodnogo rastvoreniya materialov pri vysokikh plotnostyakh toka [On the influence of surface films on the character of anodic dissolution of materials at high current densities]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1980, no. 4, pp. 17–21. (In Russian)
9. Kabanov B.N. *Elektrokhimiya metallov i adsorbtsiya* [Electrochemistry of metals and adsorption]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 104 p.
10. Davydov A.D., Kamkin A.N. Razvitie teorii anodnoi aktivatsii passivnykh metallov [Development of the theory of passive activation of the anode metal]. *Elektrokhimiya – Russian Journal of Electrochemistry*, 1978, vol. 14, no. 7, pp. 979–992. (In Russian)
11. Krylov V.S., Davydov A.D., Kozak E. Problemy teorii elektrokhimicheskogo formoobrazovaniya i tochnosti razmernoi elektrokhimicheskoi obrabotki [The problems of the electrochemical shaping theory and precision of a dimensional]. *Elektrokhimiya – Russian Journal of Electrochemistry*, 1975, vol. 11, no. 8, pp. 1155–1179. (In Russian)
12. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I. [Research electrolytes, providing precision electrochemical machining of copper M1]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii–2014"* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Innovations in Mechanical Engineering Based on Technological Development of Russia–2014"]. Barnaul, 2014, pt. 2, pp. 100–104. (In Russian)
13. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Moiseenko A.N. [Electro-diamond processing of sprayed wear resistant coatings]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Inzheneriya poverkhnostnogo*

sloya detalei mashin» [Proceedings of the International Scientific-Practical Conference “Engineering of the Surface Layer of Machine Parts”], Kemerovo, 2009. pp. 365–368. (In Russian)

14. Rakhimyanov Kh.M., Krasil'nikov B.A., Rakhimyanov K.Kh.. *Tochnost' formoobrazovaniya pri elektroalmaznoi prorezke pazov v amorfnykh i nanokristallicheskiykh splavakh* [Forming accuracy at electro-diamond slotting grooves in the amorphous and nanocrystalline alloys]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2006, no. 2 (31), pp. 32–33.

15. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Zakharov A.S., Vasilevskaya S.I. *Vliyanie gidrodinamicheskogo rezhima na skorost' anodnogo rastvoreniya medi v passiviruyushchikh elektrolitakh* [Influence of hydrodynamic conditions on the rate of anodic dissolution of copper in the passivating electrolytes]. *Mekhaniki XXI veku – Mechanics of the XXI century*, 2015, no. 14, pp. 112–115.

16. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P. *Intensifikatsiya elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki nerzhavayushchei stali lazernym izlucheniem* [Intensification electrochemical dimensional machining of stainless steel by laser light]. *Mekhaniki XXI veku – Mechanics of the XXI century*, 2008, no. 7, pp. 149–152.

17. Davydov A.D., Kashcheev V.D., Kabanov B.N., Khryapina E.A. [Changing the degree of localization of the anodic dissolution of metals in the transition to a pulsed mode electrochemical machining]. *Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin. EKHO-80”* [Abstracts of All-Russian Scientific and Technical Conference “Dimensional Electrochemical Machining of Machine Parts. ECM-80”]. Tula, 1980, pp. 8–13. (In Russian)

18. Petrov Yu.N., Korchagin G.N., Zaidman G.N., Saushkin V.P. *Osnovy povysheniya tochnosti elektrokhimicheskogo formoobrazovaniya* [Basics improve the accuracy of electrochemical shaping]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1977. 62 p.

19. Freiman L.I., Makarov V.A., Bryskin I.E. *Potentsiostaticheskie metody v korrozionnykh issledovaniyakh i elektrokhimicheskoi zashchite* [Potentiostatic methods in studies of corrosion and electrochemical protection]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972. 240 p.

20. Dikumar A.I., Domente G.S., Engel'gardt G.R. *Anodnoe rastvorenie medi v kontsentrirrovannykh rastvorakh nitratov pri vysokikh plotnostyakh toka* [Anodic dissolution of copper in the concentrated solutions of nitrates at high current densities]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1983, no. 3, pp. 21–28.

21. Vasilevskaya S.I., Gerasimov N.V. [Research the behavior of anode copper in conditions of electrochemical machining]. *Trudy XVI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nauka. Promyshlennost'. Oborona», posvyashchennoi 70-letiyu Pobedy v Velikoi Otechestvennoi voine* [Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Technical Conference “Science. Industry. Defense”, dedicated to the 70th anniversary of the Victory of the Great Patriotic War]. Novosibirsk, 2015, pp. 178–182. (In Russian)

22. Petrenko V.I., Dikumar A.I. [Factors determining the throwing power of electrolytes in the electrochemical dimensional machining of metals]. *Sbornik statei Instituta prikladnoi fiziki AN MSSR «Teoriya i praktika elektrokhimicheskoi obrabotki metallov»* [Proceedings of the Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the MSSR “Theory and Practice of Electrochemical Machining of Metals”], 1976, pp. 43–64. (In Russian)

23. Davydov A.D. *Mekhanizm lokalizatsii protsessa anodnogo rastvoreniya metallov pri elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotke* [The mechanism of the localization process of anodic dissolution of metals in the electrochemical processing]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1975, vol. 11, no. 5, pp. 809–810. (In Russian)

24. Volkov K.N. *Modelirovanie krupnykh vikhrei turbulentnogo teploobmena v oblasti vzaimodeystviya krugloi strui s ploskoi pregradoi* [Large eddy simulation in a fully developed turbulent flow in a channel and comparison of subgrid eddy viscosity models]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol. 47, no. 3, pp. 31–42. (In Russian)

25. Saushkin B.P., Zaidman G.N. [On the scattering power of electrolytes used in electrochemical dimensional machining]. *Materialy III Vsesoyuznoi konferentsii po elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotke metallov «Novoe v elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotke metallov»* [Proceedings of the III All-Union Conference on Electrochemical Dimensional Machining of Metals “New in Electrochemical Dimensional Machining of Metals”]. Kishinev, 1972, pp. 45–46. (In Russian)

Article history:

Received 3 July 2015

Revised 17 July 2015

Accepted 12 August 2015