

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-93-100

УДК 621.9.047

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ARMCO-ЖЕЛЕЗА И ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ-4 В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

ANODE BEHAVIOR OF ARMCO-IRON AND TITANIUM OT-4 ALLOYS UNDER CONDITIONS OF ELECTROCHEMICAL MACHINING

Гаар Надежда Петровна,
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: gaar@corp.nstu.ru
Nadezhda P. Gaar, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Локтионов Александр Анатольевич,
старший преподаватель, e-mail: loktionov@corp.nstu.ru,
Aleksandr A. Loktionov, Senior Lecturer,
Давыдова Светлана Анатольевна,
магистрант, e-mail: davydovas.a@mail.ru
Svetlana A. Davydova, Graduate student
Иванова Юлия Сергеевна,
магистрант, e-mail: lilul207@yandex.ru
Yulia S. Ivanova, Graduate student

Новосибирский государственный технический университет 630073, Россия,
г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073,
Russian Federation.

Аннотация: Электрохимическая размерная обработка материалов является одной из разновидностей электрофизических методов, применяемых в машиностроении. Она основывается на анодном растворении материала под действием электрического тока в токопроводящей среде и используется для формообразования поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов, зачастую многокомпонентных. Исследование электрохимического растворения однокомпонентных материалов позволит не только определить ограничение в низкой производительности процесса в многокомпонентном сплаве, но и облегчит поиск механизмов его активации. Целью настоящей работы является установление особенностей электрохимического растворения ARMCO-железа и титанового сплава ОТ-4 в водном растворе нитрата натрия с различной концентрацией соли. Исследования проводились при помощи потенциодинамического и потенциостатического методов, являющихся традиционными в электрохимии при установлении характера анодного растворения. Для развертки потенциалов и регистрации установившегося значения тока применялся потенциостат-гальваностат IPC-Pro, в качестве электрода сравнения использовался платиновый электрод сравнения. Диапазон исследуемых значений потенциалов от 0 до 5 В, скорость развертки потенциала - 60 мВ/с. В результате анализа полученных данных установлено, что титановый сплав ОТ-4 электрохимически не растворяется в водных растворах нитрата натрия из-за образования на поверхности окислых пленок. Анодное растворение ARMCO-железа в водных растворах нитрата натрия происходит при потенциалах выше 1,7 В и сопровождается восстановлением кислорода на поверхности материала. Изменение концентрации соли в электролитах от 10 % до 30% не приводит к существенному изменению анодного поведения материала.

Abstract: Electrochemical dimensional machining of materials is one of the varieties of electrophysical methods used in engineering. It is based on the anodic dissolution of the material under the action of electric current in a conductive environment and is used to form the surfaces of parts made of hard-working materials, including multicomponent ones. The study of the electrochemical dissolution of single-component materials will allow us not only to determine the limitation in the low productivity of the process in a multicomponent alloy but will also facilitate the search for the mechanisms for its activation. The purpose of this work is to establish the specific features of electrochemical dissolution of ARMCO-iron and titanium OT-4 in an aqueous solution of sodium nitrate with different salt concentrations. The studies were carried out by using potentiodynamic and potentiostatic methods, which are traditional in electrochemistry in establishing the character of anodic dissolu-

tion. Potentiostat-galvanostat IPC-Pro was used to scan potentials and register a steady-state current value, and a platinum reference electrode was used as a reference electrode. The range of the potentials under study was from 0 to 5 V, at a scan rate of 60 mV / s. As a result of the experimental data analysis, it was established that the titanium alloy OT-4 is not electrochemically soluble in aqueous solutions of sodium nitrate due to the formation of oxide films on the surface. Anodic dissolution of ARMCO-iron in aqueous solutions of sodium nitrate occurs at potentials above 1.7 V and is accompanied by the oxygen recovering on the surface of the material. A change in the salt concentration in electrolytes from 10% to 30% does not lead to a significant change in the anodic behavior of the material.

Ключевые слова: электрохимическое растворение, титановые сплавы, ARMCO-железо, нитрат натрия, окисные пленки.

Key words: electrochemical dissolution, titanium alloys, ARMCO-iron, sodium nitrate, oxide films.

В современном машиностроении электрофизические методы обработки привлекают все большее внимание при обработке материалов, которые имеют ограничения при традиционной механической обработки. С другой стороны, электрофизические методы обработки не характеризуются такой же высокой производительностью как механическая. Ввиду этого, постоянно ведутся поиски по их интенсификации. Не обошла эту тенденцию и электрохимическая обработка [1-7].

Среди способов, при помощи которых пытаются активировать процесс анодного растворения материала, наиболее эффективным можно считать лазерно-электрохимическую обработку (ЛЭХО) [8-11]. При ее использовании лазерное излучение вводится через электролит в зону обработки, благодаря чему задействуются целая гамма механизмов активации процесса электрохимического растворения (гидравлический, тепловой, светогидравлический, химический и т.д.) [12]. Однако, использование ЛЭХО требует проведение предварительных исследований для каждого сочетания обрабатываемый материал-электролит с целью определения причин низкой производительности процесса в стационарных условиях, а затем подбора режимов лазерного излучения (длины волны, частоты, средней мощности излучения и т.д.) с позиции достижения максимальной производительности процесса.

В данной работе в качестве исследуемых материалов были выбраны – ARMCO-железо и титановый сплав OT-4. ARMCO-железо было выбрано в связи с тем, что данный материал можно считать практически однокомпонентным, что дает возможность понимания процессов, происходящих в электрохимической ячейке. Кроме того, его анодное поведение в стационарных условиях более или менее изучено, что позволит сравнить полученные результаты на специально спроектированной для ЛЭХО установки [13] с литературными источниками. Титановые сплавы, представителем которых является OT-4, характеризуются низкой производительностью при электрохимической обработки из-за образования на поверхности окисных пленок различной природы [14, 15], что дает возможность предположить, что дальнейшее применение для его обработки ЛЭХО будет эф-

фективно в части ее применения для данного класса материалов.

Традиционно исследование анодного поведения материала производится при помощи поляризационных методик – потенциодинамической и потенциостатической. Поляризационные кривые, полученные при помощи потенциодинамического метода, дают представление об общих особенностях анодного растворения исследуемого материала, о диапазонах потенциалов, соответствующих растворению или пассивации материала. Однако из-за того, что в потенциодинамическом методе используется линейная развертка потенциалов, а поляризация электрода изменяется во времени, при достаточно большой скорости развертки потенциала переходные процессы на электроде могут не успеть произойти. Это приведет к тому, что регистрируемый ток будет соответствовать току неустановившегося процесса [16]. Поскольку оптимальную скорость развертки потенциалов расчетным путем невозможно установить, то в этом случае для получения более достоверных результатов в совокупности с потенциодинамическим методом используют потенциостатический метод исследования.

Исследования проводились на специально изготовленной установке, позволяющей проводить как поляризационные исследования в стационарных условиях (без наложения лазерного излучения), так и в дальнейшем – с наложением лазерного излучения различными длинами волн и их комбинациями. Это позволит обеспечить идентичность условий проведения экспериментов.

В состав установки для поляризационных исследований в стационарных (без наложения лазерного излучения) условиях входит: нестандартная электрохимическая ячейка [17]; персональный компьютер, с установленным на нем программным обеспечением; потенциостат-гальваностат IPC-Pro (рис. 1). В качестве электрода сравнения в ячейке используется платиновый электрод.

В качестве электролита был выбран водный раствор нитрата натрия с концентрацией соли от 10 до 30%. Данный электролит является распространенным. Он используется в электрохимической промышленности для большого числа обрабатываемых электрохимически материалов [18-

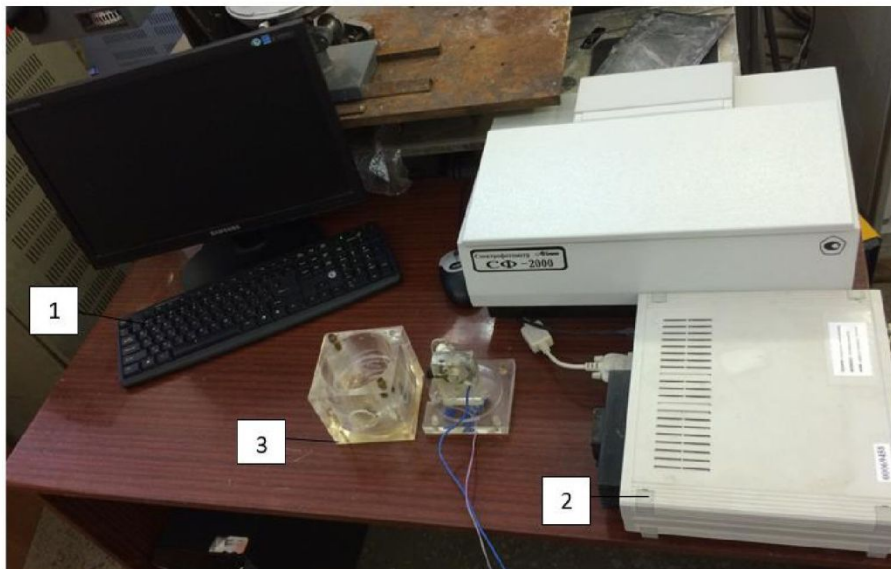


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки для исследования анодного поведения материала при помощи поляризационных исследований:

1- персональный компьютер, 2- потенциостат IPC-Pro, 3-электрохимическая ячейка
 Fig.1. Appearance of the experimental setup for studying the anodic behavior of a material by means of polarization studies:

1- personal computer, 2 potentiostat IPC-Pro, 3-electrochemical cell

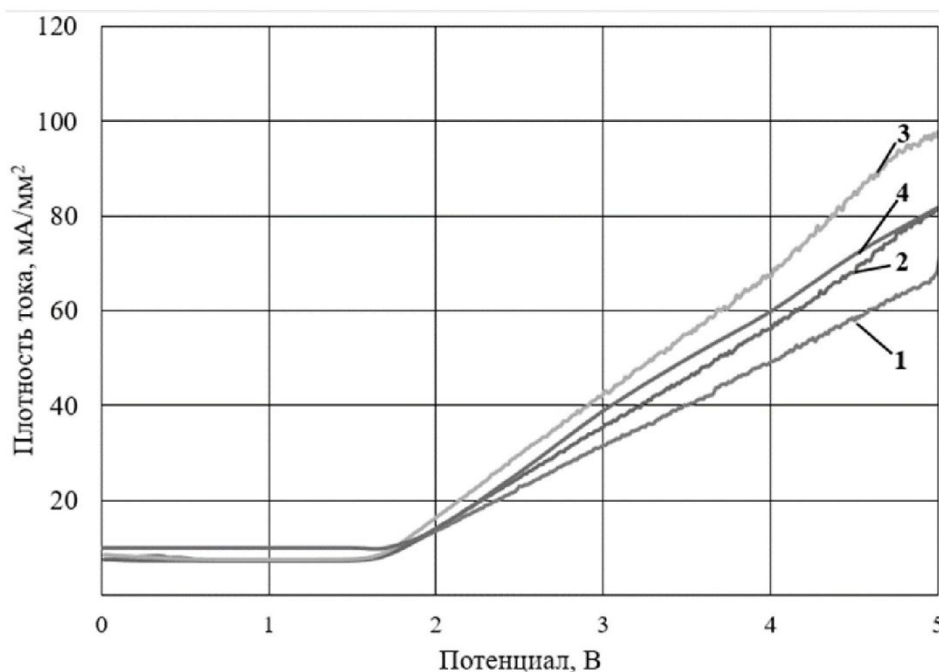


Рис.2.Потенциодинамические кривые для ARMCO-железа в водных растворах NaNO_3 при концентрации соли: 1-10%, 2-15%, 3-20%, 4-30%

Fig.2. Potentiodynamic curves for ARMCO –iron in NaNO_3 water solution at a salt concentration: 1-10%, 2-15%, 3-20%, 4-30%

23]. Кроме того, данный состав электролита соответствует требованиям к электролитам при лазерно-электрохимической обработке [24].

На рис 2 - 5 представлены поляризационные кривые, полученные при помощи потенциодинамического метода для ARMCO-железа. Поляризационные исследования по анодному растворению титанового сплава ОТ-4 не приведены, так для

всех концентраций во всем диапазоне потенциалов значение плотности тока были равны нулю, что свидетельствует об отсутствии процесса анодного растворения материала как такового. Возможной причиной такого состояния материала может служить образование на поверхности пленок, которые покрывая ее, запирают процесс растворения материала, что подтверждается данными

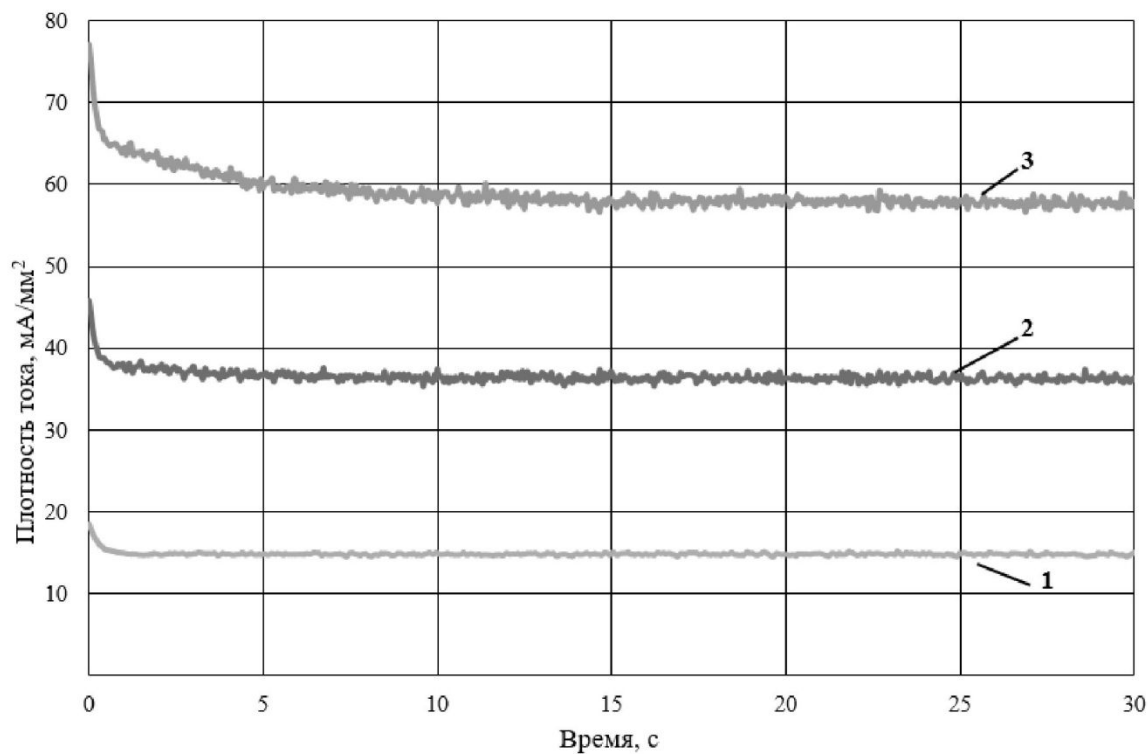


Рис. 3. Потенциостатические кривые для ARMCO-железа в водном растворе NaNO_3 при концентрации соли 10% для потенциалов: 1-2 В, 2-3 В, 3-4 В

Fig.3. Potentiostatic curves for ARMCO –iron in 10% NaNO_3 water solution at potentials: 1-2 V, 2-3 V, 3-4 V

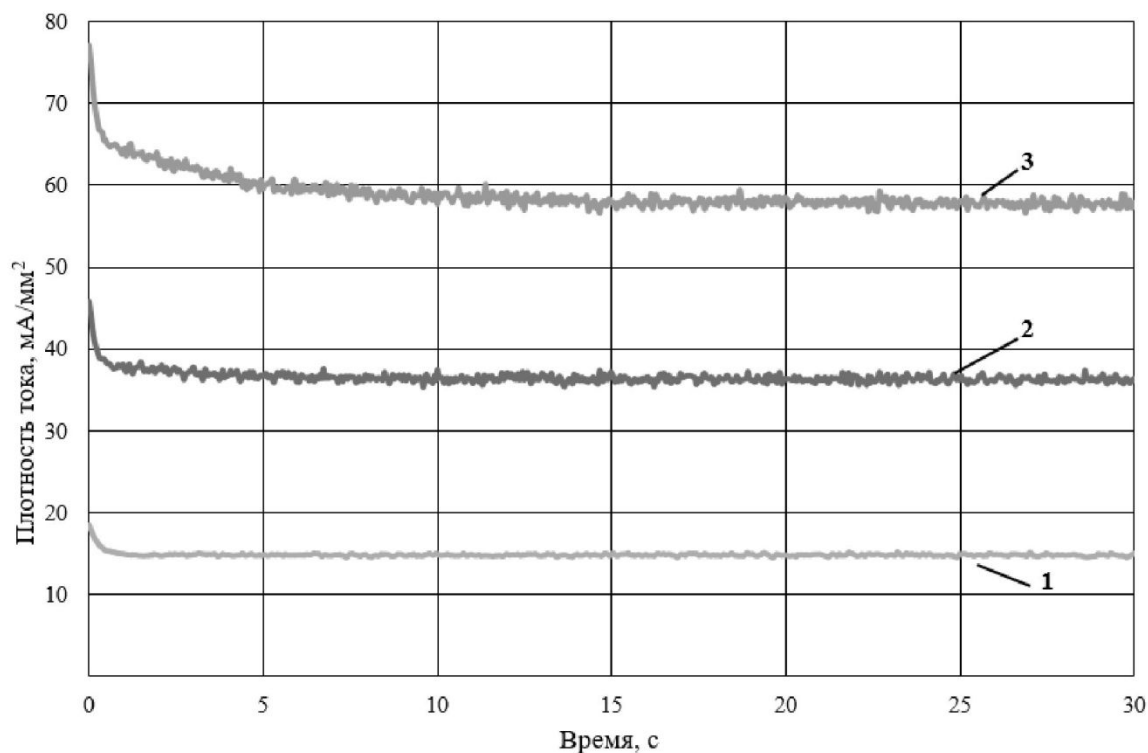


Рис. 3. Потенциостатические кривые для ARMCO-железа в водном растворе NaNO_3 при концентрации соли 10% для потенциалов: 1-2 В, 2-3 В, 3-4 В

Fig.3. Potentiostatic curves for ARMCO –iron in 10% NaNO_3 water solution at potentials: 1-2 V, 2-3 V, 3-4 V

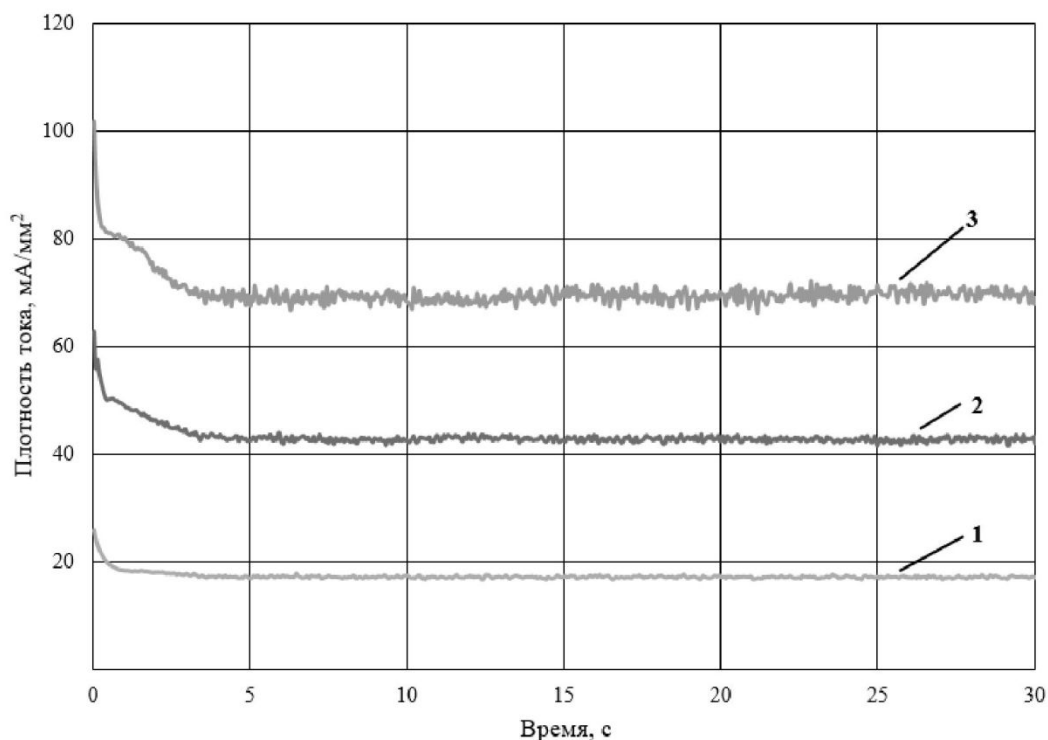


Рис. 5. Потенциостатические кривые для ARMCO-железа в водных растворах NaNO_3 при концентрации соли 20% для потенциалов: 1-1 В, 2-2 В, 3-3 В, 4-4 В

Fig.5. Potentiostatic curves for ARMCO-iron in 15% NaNO_3 water solution at potentials: 1-2 V, 2-3 V, 3-4 V

работ [16, 25]. Увеличение концентрации соли не привело к изменению анодного поведения титанового сплава.

Анализ поляризационной кривой (рис. 2), полученной при помощи потенциодинамического метода для всех исследуемых концентраций соли электролита указывает на тот факт, что поляризационные кривые имеют два характерных участка поляризационной кривой – в диапазоне потенциалов от 0 до 1,7 В, где значение плотности тока с ростом потенциала остается постоянным, и в диапазоне потенциалов свыше 1,7 В до 5 В, где наблюдается рост плотности тока с увеличением потенциала. С точки зрения электрохимических процессов первый участок поляризационной кривой следует рассматривать как участок пассивного растворения материала, а второй – активного.

Сравнение между собой поляризационных кривых, полученных при помощи потенциодинамического метода для концентрации соли от 10 до 20%, указывает на тот факт, что увеличение ее концентрации в электролите приводит к увеличению достигаемых значений плотностей тока для одних и тех же значений потенциалов. Так при концентрации нитрата натрия равным 10% максимальное значение плотности (при потенциале 5 В) тока равно 67 mA/mm^2 , тогда как при концентрации в 15% - 81 mA/mm^2 ; 20 % - 97 mA/mm^2 . Повышение концентрации нитрата натрия до 30% приводит к снижению достигаемых значений плотности тока по сравнению с 20% концентрацией соли

(до 82 mA/mm^2 при потенциале 5 В). Это может объясняться тем фактом, что при концентрации нитрата натрия свыше 20% динамическая вязкость электролита достигает такого значения, при котором движение анионов электролита замедляется, вследствие чего скорость анодных процессов снижается. Это приводит, в свою очередь, к снижению плотности тока.

Для подтверждения характера (без возможного влияния инерционных процессов при развертке потенциалов) растворения на полученных на потенциодинамических кривых были сняты потенциостатические кривые для всех исследуемых концентраций соли для одних и тех же потенциалов – 2 В, 3 В, 4 В (рис. 3, 4, 5). Анализ полученных потенциостатических кривых подтверждает характер протекания стабильного процесса в обозначенных областях, так как плотность тока со временем не падает, а остается постоянным. С другой стороны визуальный осмотр образцов после проведения потенциостатических исследований не выявил какого-либо растворения поверхности материала образца даже при увеличении времени снятия кривых с 30 секунд до 5 минут. Это говорит о том, что процесс, который был зафиксирован при снятии потенциодинамических кривых и подтвержденный после снятия потенциостатических кривых, в большей степени связан не с растворением материала, а с другими процессами которые могут протекать на поверхности образца, например, восстановление кислорода.

Такое предположение, с одной стороны, подтверждается тем, что процессы снятия поляризационных кривых для ARMCO-железа в нитрате натрия при всех концентрациях соли визуальное сопоставлялись выделением пузырьков газа непосредственно на аноде. Потенциал восстановления кислорода ~ 2 В [6], а именно при приближении к нему на поляризационных кривых для ARMCO-железа начинается смена характерных участков растворения материала с пассивного на активный, где происходит увеличение значения плотности тока (рис. 2) с ростом потенциала.

Выводы

После проведенного анализа полученных результатов поляризационных исследований анодного поведения титанового сплава ОТ-4 и АМСО-железа в водных растворах нитрата натрия при концентрации соли от 10 до 30% можно сделать следующие выводы:

1. Титановый сплав ОТ-4 в 10% водном растворе хлорида натрия в диапазоне потенциалов от 0 до 5 В не растворяется из-за образования на поверхности окислых пленок различной природы. Увеличение концентрации соли с 10% до 30% не влияет на анодное растворение материала, т.е. растворения материала не происходит.

2. Электрохимического растворения ARMCO-

железа в водных растворах нитрата натрия в диапазоне потенциалов от 0 до 1,7 В не происходит. В диапазоне потенциалов свыше 1,7 В до 5 В анодное растворение материала происходит крайне медленно. Повышение плотности тока в указанном диапазоне происходит за счет процесса восстановления кислорода на поверхности образца. Увеличение значения концентрации соли в электролите не приводит к интенсификации процесса анодного растворения материала, а рост плотности тока с увеличением концентрации соли происходит за счет увеличения количества восстановившегося кислорода.

На основании вышеизложенных фактов можно предположить, что для титанового сплава ОТ-4 одним из направлений активации процесса электрохимического растворения в данном электролите при наложении лазерного излучения может быть разрушение окислых пленок. Для интенсификации процесса электрохимического растворения ARMCO-железа – это борьба с запираемостью поверхности анода пузырьками газа (кислорода) за счет, например, гидравлического или гидравлического механизма, возникающего при наложении лазерного излучения. Подтверждение данных предположение требует проведения дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McGeough J.A. Principles of electrochemical machining. L.: Chapman and Hall, 1974 - 255 p.
2. Electrochemical machining/Eds. De Barr A. E., Oliver D.A. L.: Macdonald, 1968 - 248 p.
3. Wilson J. F. Practice and theory of electrochemical machining. N.Y.: Wiley, 1971 - 252 p.
4. Давыдов, А. Д. Высокоскоростное электрохимическое формообразование/ А. Д. Давыдов, Е. Козак -М.: Наука, 1990. - 272 с.
5. Давыдов, А. Д. Электрохимическая размерная обработка металлов: процесс формообразования/ А. Д. Давыдов, В.М. Волгин, В. В. Любимов //Электрохимия. 2004.- Т. 40.- С. 1438-1442.
6. Крылов, В. С. Проблемы теории электрохимического формообразования и точности размерной электрохимической обработки/ В. С. Крылов, А. Д. Давыдов // Электрохимия. – 1975. – Т. 11, № 8. – С. 1115–1179.
7. Петров, Ю. Н. Основные направления исследований в области ЭХРО / Ю. Н. Петров // Электрохимическая размерная обработка. – Кишинев: Штиинца, 1954. – С. 5–8.
8. Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И., Гаар Н.П., Локтионов А.А. Способ размерной обработки металлов и сплавов: способ размерной обработки металлов и сплавов: Патент Рос. фед. № 2451582. 2010. Заявл. 07.07.2010 № 2010128204/02. Оpubл. 27.05.2012, Бюл. № 15. 11 с.
9. Pajak P. T., Desilva A. K.M., Harrison D. K., Mcgeough J.A. Precision and efficiency of laser assisted jet electrochemical machining//Precis. Eng. 2006. V. 30. P. 288.
10. Самусев, В. Г. Разработка и исследование метода интенсификации электрохимической обработки различных материалов с помощью оптических квантовых генераторов: автореф. дис. канд. техн. наук – Новочеркасск : НПИ, 1979. – 20 с.
11. Филимоненко В. Н. Воздействие излучения ОКГ на анодное растворение металлов /В. Н. Филимоненко, В. Г. Самусев // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1976. – № 4. – С. 9–12.
12. Rakhimyanov H.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) // Proceedings of IFOST-2008 - 3rd International forum on strategic technologies. – Novosibirsk-Tomsk, 2008. – P. 106–107.
13. Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И., Гаар Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2. – С. 135–144.

14. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.
15. Давыдов, А.Д. Электрохимическая обработка титана (обзор)/ А.Д. Давыдов, Т.Б. Кабанова, В.М. Волгин //Электрохимия – 2017. - № 9 (53) – С. 1056-1082.
16. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке/ А. И. Дикусар, Г. Р. Энгельгардт, В. И. Петренко, Ю. Н. Петров. – Кишинев: Штиинца, 1983. – 206 с.
17. Рахимьянов, Х. М., Гаар Н. П. Электрохимическая ячейка для исследования интенсификации ЭХРО лазерным излучением. // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса. Труды первой всероссийской научно-технической конференции, конф., Кемерово., 24-25 октября 2007 г - 2007 г.- С. 251-254.
18. Мороз И.И. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 208с.
19. Атанасянц, А. Г. Электрохимическое изготовление деталей атомных реакторов / А. Г. Атанасянц. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 176 с.
20. Амирханов, Н. А. Электрохимическая размерная обработка материала в машиностроении/ Н. А. Амирханов, А. Н Зайцев, Р. А. Зарипов. – Уфа: Уфим. гос. авиацион. техн. ун-т, 2004. – 258 с.
21. Саушкин, Б. П. Выбор и применение электролитов для электрохимической обработки металлов / Б. П. Саушкин. – М.: ВНИИИТЭМР, 1992. – 68 с.
22. Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов / М. А. Толстая, А. П. Анисимов, М. В. Щербак, В. Х. Постаионов. – М.: Машиностроение, 1981. – 263 с.
23. Байсупов, И. А. Электрохимическая обработка металлов / И. А. Байсупов. – М.: Высш. шк., 1981. – 150 с.
24. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Гаар Н.П., Журавлев А.И., Локтионов А.А. Методика выбора электролита для лазерно-электрохимической обработки// Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 2. – С. 18–21.
25. Маслов, А. В. Электрохимическая обработка титановых сплавов в неводных и водно-органических электролитах: автореф. дис. канд. техн. наук -М. : МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1986. – 16 с.

REFERENCES

1. McGeough J.A. Principles of electrochemical machining. L.: Chapman and Hall, 1974 - 255 p.
2. Electrochemical machining/Eds. De Barr A. E., Oliver D.A. L.: Macdonald, 1968 - 248 p.
3. Wilson J. F. Practice and theory of electrochemical machining. N.Y.: Wiley, 1971 - 252 p.
4. Davydov, A. D. Vysokoskorostnoye elektrokhimicheskoye formoobrazovaniye [High-speed electrochemical shaping]/ A. D. Davydov, E. Kozak - Moscow: The science, 1990. - 272 p.
5. Davydov, A. D. Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov: protsess formoobrazovaniya [Electrochemical dimensional processing of metals: the process of shaping]. A. D. Davydov, V.M. Volgin, V. V. Lyubimov. Elektrokhiimiya [Electrochemistry]. 2004.- Vol. 40.- pp. 1438-1442.
6. Krylov, V. S. Problemy teorii elektrokhimicheskogo formoobrazovaniya i tochnosti razmernoy elektrokhimicheskoy obrabotki [Problems in the theory of electrochemical shaping and the accuracy of dimensional electrochemical processing]/ V. S. Krylov, A. D. Davydov // Elektrokhiimiya [Electrochemistry]. – 1975. – Vol. 11, No 8. – pp. 1115–1179.
7. Petrov, Yu. N. Osnovnyye napravleniya issledovaniy v oblasti EKhRO [The main areas of research in the field of EXPO]/ Yu. N. Petrov // Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka [Electrochemical dimensional processing]. – Kishinev: Shtiintsa, 1954. – pp. 5–8.
8. Rahimyanov Kh.M., Zhuravlev A.I., Gaar N.P., Loktionov A.A. Sposob razmernoy obrabotki metallov i splavov: sposob razmernoy obrabotki metallov i splavov [Method of dimensional processing of metals and alloys: a method of dimensional processing of metals and alloys]: Patent of Ros. fed. No 2451582. 2010. Claiming. 07.07.2010 No 2010128204/02. Publ. 27.05.2012, Byul. No 15. 11 p.
9. Pajak P. T., Desilva A. K.M., Harrison D. K., Mcgeough J.A. Precision and efficiency of laser assisted jet electrochemical machining//Precis. Eng. 2006. V. 30. P. 288.
10. Samusev, V. G. Razrabotka i issledovaniye metoda intensivatsii elektrokhimicheskoy obrabotki razlichnykh materialov s pomoshchyu opticheskikh kvantovykh generatorov [Razrabotka i issledovaniye metoda intensivatsii elektrokhimicheskoy obrabotki razlichnykh materialov s pomoshchyu opticheskikh kvantovykh generators]: author's abstract. dis. Cand. tech. science – Novocherkassk: NPI, 1979. – 20 p.
11. Filimonenko V. N. Vozdeystviye izlucheniya OKG na anodnoye rastvoreniye metallov [The effect of laser

radiation on the anodic dissolution of metals] / V. N. Filimonenko, V. G. Samusev // *Elektrofizicheskiye i elektrokhimicheskiye metody obrabotki* [Electrophysical and electrochemical methods of processing]. – 1976. – No 4. – pp. 9–12.

12. Rakhimyanov H.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) // *Proceedings of IFOST-2008 - 3rd International forum on strategic technologies*. – Novosibirsk-Tomsk, 2008. – pp. 106–107.

13. Rakhimyanov Kh.M., Zhuravlev A.I., Gaar N.P. Ustanovka dlya issledovaniya elektrokhimicheskikh protsessov v usloviyakh lazernoy aktivatsii protsess elektrokhimicheskoy razmernoy obrabotki [Installation for the study of electrochemical processes under laser activation of the process of electrochemical dimensional processing] // *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific Herald NSTU]. – 2010. – No 2. – pp. 135–144.

14. Il'in A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanovyye splavy. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik [Titanium alloys. Composition, structure, properties. Directory] – Moscow: VILS –MATI, 2009. – 520 p.

15. Davidov, A.D. Elektrokhimicheskaya obrabotka titana (obzor) [Electrochemical treatment of titanium (review)] / A.D. Davidov, T.B. Kabanova, V.M. Volgin // *Elektrokhiimiya* [Electrochemistry] – 2017. – No 9 (53) – pp. 1056–1082.

16. Ehlektronnyye processy i process perenosa pri ehlektrorhimicheskoy razmernej obrabotke [Electronic processes and transfer process in electrochemical dimensional processing] / A. I. Dikudar, G. R. Ehngelgart, V. I. Petrenko, Yu. N. Petrov. – Kishinev: Shtiintsa, 1983. – 206 p.

17. Kh. M. Rakhimyanov, N. P. Gaar. Jelektrohimicheskaya jachejka dlja issledovaniya intensivatsii JeHRO lazernym izlucheniem [Electrochemical cell for investigation of DECM intensification by laser radiation], *Proceedings of the first Russian Scientific-Technical Conference, Modern ways for machine-building and auto-transport development in Kuzbass*, Oct. 24-25, Kemerovo, Kuzbass State Technical University -2007- pp. 251-254.

18. Moroz I.I. Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov [Electrochemical treatment of metals]. – Moscow: Mechanical engineering, 1969. – 208 p.

19. Atanosyanc, A. G. Jelektrohimicheskoe izgotovlenie detalej atomnich reaktorov [Electrochemical production of nuclear reactor parts] / A. G. Atanosyanc. – Moscow: Energoatomizdat, 1987. – 176 p.

20. Amirkhanova, N.A. Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka materiala v mashinostroyenii [Electrochemical dimensional processing of a material in mechanical engineering] / N.A. Amirkhanova, A. N Zaytsev, P. A. Zaripov. – Ufa: Ufim. state. air-tion. tech. un-t, 2004. – 258 p.

21. Saushkin, B. P. Vybor i primeneniye elektrolitov dlya elektrokhimicheskoy obrabotki metallov [Selection of i primeneniye elektrolitov dlya elektrokhimicheskoy obrabotki metallov] / B. P. Saushkin. – Moscow: VNIITEMR, 1992. – 68 p.

22. Osnovy teorii i praktiki elektrokhimicheskoy obrabotki metallov i splavov [Fundamentals of the theory and practice of electrochemical processing of metals and alloys] / M. A. Tolstaya, A. P. Anisimov, M. V. Sherbak, V. H. Postanogov. – Moscow: Mechanical engineering, 1981. – 263 p.

23. Boysupov, I.A. Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov [Electrochemical treatment of metals] / I. A. Boysupov. – Moscow: High school- 1981. – 150 p.

24. Kh. M. Rakhimyanov, B. A. Krasilnikov, N. P. Gaar, A. I. Zhuravlev, A. A. Loktionov. Metodika vybora elektrolita dlya lazerno-elektrokhimicheskoy obrabotki [Method of selection electrolyte for laser-electrochemical treatment], *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science] – 2012-No 55, pp. 18-21.

25. Maslov, A.V. Elektrokhimicheskaya obrabotka titanovykh splavov v nevodnykh i vodno-organicheskikh elektrolitakh [Electrochemical treatment of titanium alloys in non-aqueous and aqueous-organic electrolytes - author's abstract. dis. Cand. tech. science, Moscow : MHTI named after D. I. Mendeleyev, 1986. – 16 p.

Поступило в редакцию 20.04.2018

Received 20.04.2018