

По модели Дубинина-Радущкевича энергия адсорбции (E , кДж/моль) для DB15 была наибольшей (191,04 кДж/моль), что свидетельствует о наличии химической адсорбции.

В заключение можно сказать, что модель адсорбции Ленгмюра для всех адсорбентов DB, DB25 и DB15 имеет высокие значения R^2 и хорошо описывает данные. Среди адсорбентов бентонит DB15 продемонстрировал наивысшую эффективность адсорбции по всем моделям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Owlad M., Aroua M.K., Daud W.M.A.W. Hexavalent chromium adsorption on impregnated palm shell activated carbon with polyethyleneimine // *Desalination* 2010. P.71–77. Doi: 10.1016/j.desal.2009.12.003.
2. Owlad M., Aroua M.K., Daud W.A.W., Baroutian S. Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: A review // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2009. P.311–333 Doi: 10.1007/s11270-009-0030-3
3. M. Murugesan., M. Sathishkumar., K. Swaminathan. Bioremediation of chromium contaminated soil: optimization of operating parameters under laboratory conditions // *Journal of Hazardous Materials* 2006. P.29–36. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.048.
4. Li X., Wu D. *Nanoclay Applications in Advanced Materials: Bentonite-Based Nanocomposites* // *Journal of Nanotechnology*. 2025 №42(7), P.1312-1324.
5. Rengaraj S., Yeon K., Moon S.H. Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins // *Journal of Hazardous Materials*. 2001. P.255–264 Doi: 10.1016/S0304-3894(00)00305-1
6. Shukla S.R., Dabhade S.P. Separation, recovery and recycling of chromium from wastewater obtained during reverse osmosis treatment of tannery effluent // *Resources, Conservation and Recycling*. 1992. P.105–113 Doi: 10.1016/0921-3449(92)90047-2.

УДК 544.6.018; 544.6.076; 544.63

М.Д. Белов, студ.; А.О. Сухарев, студ.;
С.А. Граири, студ.; А.В. Афанасьева, студ.
(КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТНОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛИРОВКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ

В современном производстве нашли широкое применение аддитивные методы изготовления деталей из-за ряда своих преимуществ в

сравнении с традиционными методами. Детали, изготовленные из спеченного порошка аддитивным методом, имеют высокую шероховатость поверхности (порядка 10-20 мкм), которая затрудняет применение этих деталей из-за высоких требований к качеству поверхности. Это связано с тем, что детали изготавливаются из металлического порошка, в результате чего присутствуют неровности и поры. В виду этого современное производство требует применения эффективных методов обработки печатных поверхностей, так как, традиционные механические и химические методы обработки могут быть малоприменимы для печатных деталей зачастую обладающих сложной геометрией рабочих поверхностей в сравнении с изготовленными традиционными методами. Один из наиболее универсальных и перспективных методов обработки печатных изделий – струйная электролитно-плазменная обработка (далее ЭПО) позволяющая производить высокоточную обработку поверхности с практически любой геометрией. ЭПО легко подстраивается под обработку любого сплава и обладает высокими показателями эффективности в сравнении с сухим ЭПО и с традиционными методами обработки.

В связи с тем, что технология только начинает получать широкое распространение существует множество вопросов по поводу её применения в производственных условиях. Условно все данные вопросы можно свести к «эффективности» данного способа обработки. Так как, метод позиционируется универсальным, но при этом основан сразу на принципах действия: электроэрозионное воздействие и электрохимическая полировка, то закономерно встаёт вопрос о стабильности и эффективности действия в широком спектре задач (материалов). Потому были проведены исследования эффективности технологии ЭПО для различных типов сплавов: жаропрочные сплавы (ВЖ159), нержавеющей стали (12Х18Н10Т), стали используемые в подвижных элементах области двигателестроения (РН1).

Для проведения эксперимента с использованием ЭПО применялась лабораторная установка (рис. 1), описанная в [1]. Инструментом обработки и одновременно катодом являлась сопло, в качестве анода использовались исследуемые образцы. Установка создает направленную струю электролита и может перемещать как деталь и сопло в пространстве по заданной программе. Сопло представляет собой трубку из нержавеющей стали, покрытая изолирующим материалом, который формирует струю. К соплу подается электролит из резервуара, который после истечения из сопла стекает в поддон и из его перетекает в резервуар. Перемещение сопла осуществляется промышленным роботом KUKA.



Рисунок 1. Фотография установки для проведения ЭПО

При составлении карт технологического процесса, необходим подбор режимов обработки для достижения высокого качества поверхности и сохранения размеров детали. В свою очередь подбор режима и времени обработки невозможен без знаний об эффективности обработки сплавов. В связи с этим для исследования эффективности струйного ЭПО было выбрано три распространенных сплава для аддитивного производства:

- ВЖ159 химический состав: никель – 50 %, кобальт – 30%, вольфрам – 15%, молибден – 4,5 %; применение: детали современных ГТД. [2].

- 12Х18Н10Т (AISI 321) химический состав: железо – 70%, углерод – 0,12%, хром – 17–19%, никель 9–11%, титан 0,8%. [3]

- РН 1 (ВНЛ 14) химический состав: углерод – 0,07%, хром - 14–15,5%, никель 3,5–5,5%, медь 2,5 – 4,5%, марганец – до 1%. [4].

Эти сплавы используются для изготовления деталей, применяемых в приборостроении, машиностроении, авиастроении. Данные сплавы имеют множественные аналоги, как в печати в виде порошков, так и в виде различных прокатных заготовок. Поэтому исследование эффективности на этих сплавах будет актуально и при традиционном производстве. Помимо этого, выбор так же обусловлен тем, что все эти сплавы обрабатываются одним и тем же сульфатным электролитом, без изменения состава и концентрации. В качестве электролита использовался раствор $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ с массовой долей в растворе 5%.

В качестве меры эффективности будет выступать сравнение шероховатости изделий (Параметр R_a в мкм) до начала обработки и после ее завершения в течении 1 минуты. К абсолютному большинству изделий предъявляется требование по уровню шероховатости поверхности, потому данный критерий для оценки качества обработки является определяющим. Для изучения шероховатости были выбраны траектории замеров с длиной трассы 6,5 мм.

При проведении обработки сплавов не изменялись показатели напряжения, состав и концентрация электролита, время обработки. Пробные образцы (детали) изготавливаемы из этих сплавов используются в закаленном виде, потому возникла необходимость в оценке влияния фактора термообработки на процесс ЭПО. Результаты обработки были представлены в таблице замеров шероховатости.

Таблица 1 – Результаты замеров шероховатости (мкм)

Состояние материала	ВЖ159		12X18H10T (AISI 321)		PH 1	
До термической обработки	До	После	До	После	До	После
	11,0	0,908	11,4	3,92	11,9	1,30
После термической обработки	До	После	До	После	До	После
	11,7	1,06	12,2	4,97	11,7	1,63

Из полученных результатов шероховатости следует, что скорость обработки поверхности напрямую зависит от коррозионной стойкости сплава, скорости химического травления и наличия термической обработки.

Анализируя полученные данные шероховатости был сделан вывод, что скорость обработки поверхности напрямую зависит от скорости химического травления материала, которая, в свою очередь зависит, от коррозионной стойкости сплава. Исходя из этого можно сделать промежуточный вывод, что чем выше коррозионная стойкость материала, тем больше времени требуется на его обработку. Этим объясняется высокая скорость обработки сплава ВЖ 159 в сравнении с 12X18H10T, который из-за своей высокой коррозионной стойкости применяется в химической и пищевой промышленности.

Так же был сделан вывод, что для достижения шероховатости поверхности порядка, $R_a = 1$ мкм для сплава 12X18H10T необходимо увеличить время обработки в 4 раза (до 4 минут), для PH 1 в 1,5 раза (до 1,5 минут).

Для деталей прошедших термическую обработку следует дополнительно увеличить время обработки:

- в 1,25 раза (до 5 минут) для сплава 12X18H10T,
- в 1,22 раза (до 2 минут) для PH 1
- в 1,16 раза (до 1,5 минут) у ВЖ159.

Данные коэффициенты получены экспериментально. Ввиду этого рекомендуется проводить ЭПО до отправки деталей на термическую обработку. После процесса термической обработки необходимо провести повторную полировку/очистку поверхности, что позволит избавить поверхность детали от оксидов.

Подводя итог, на основе полученных данных о шероховатости поверхности изделий, изготовленных аддитивным методом - сделан вывод о необходимости проведения тестов для всех обрабатываемых

материалов, чтобы иметь представление о фактической скорости процесса ЭПО, что требуется для составления технологических карт в условиях реальных производств и оптимизации сопутствующих процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Д. Белов, А.А. Терентьев, К.Ю. Нагулин, А.Х. Гильмутдинов. Струйная электролитно-плазменная обработка как способ полировки поверхности сложнопрофильных изделий аддитивного производства // III Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур». – 2022. – №3. – С. 377-380. – Текст.
2. К.Ю. Нагулин, А.А. Терентьев, М.Д. Белов, А.Х. Гильмутдинов. Струйная электролитно-плазменная постобработка деталей газотурбинных двигателей, изготовленных аддитивными методами // известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2022. – №4. – С. 166-173.
3. ТУ 14-131-1042-2008 Прутки-прессизделия из жаропрочного сплава ХН58МБЮ-ИД (ЭК171-ИД, ВЖ159-ИД). - URL: <https://russkijmetall.ru/splav/#:~:text=Сплав%20ВЖ159.,%3В%20применение%3А%20детали%20современных%20ГТД> (дата обращения: 24.11.2024). – Текст: электронный.
4. ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 марта 2014 г. N 65-П): Дата введения 01.01.2015.
5. Electro Optical Systems Robert-Stirling-Ring 1 D-82152 Stainless Steel PH1 for EOSINT M 270 // FATHOM Advanced Manufacturing URL: <https://rt-ecat.ru/f/ph1.pdf> (дата обращения: 24.11.2024).

УДК 541.183:544.725

D.K. Khandamova, PhD assistant;
Sh.P. Nurullaev, Professor;
Z.S. Alixonova, Associate professor;
O.O. Babaev, doctoral student
(Tashkent Institute of Chemical Technology, Uzbekistan)

ISOTHERMAL MODELS OF ADSORPTION OF IRON IONS BY ORGANO Bentonites IN

Introduction. The contamination of water resources with iron (Fe^{2+}) ions is a significant environmental problem due to its negative impact on human health and aquatic ecosystems. Traditional water treatment methods often fail to effectively remove Fe^{2+} ions [1, 2]. In recent years, researchers have investigated the use of bentonite-based adsorbents as a promising