

ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА В РАЗРАБОТАННОЙ ПОРТАТИВНОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ФОЛЬГИ

М.Н. Носкова^{1, 2}

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), г. Челябинск, Россия

В статье представлены результаты компьютерного моделирования процесса перемешивания электролитического раствора в разработанной портативной установке для получения медной фольги, предназначенной для исследовательских целей. Перемешивание электролитического раствора при получении медной фольги путем электролиза необходимо для поддержания постоянной концентрации ионов меди у поверхности барабана, погруженной в электролит. Это один из контролируемых параметров, влияющих на толщину и качество получаемой полосы, а именно, за счет перемешивания электролитического раствора и поддержания тем самым постоянного состава электролита в зазоре между катодом и анодом частицы меди оседают на поверхность барабана более равномерно, вследствие чего фольга получается с более однородной структурой и одинаковой толщиной по всей длине барабана-катода. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить потери при формировании конечной ширины готовой полосы. В рамках работы было проведено исследование влияния конструктивных элементов емкости для электролита портативной установки для получения электролитической фольги на перемешивание электролитическим раствором. Для оценки зависимости перемешивания электролитического раствора от количества и расположения впускных и сливных отверстий в ванне электролизера моделирование процесса перемешивания электролита проводилось в интегрированном пакете SolidWorks Flow Simulation. Для этого было подготовлено несколько конфигураций ванны для электролита, отличающихся количеством и расположением входных и сливных отверстий. В результате проведенного исследования был сделан вывод о том, зависит ли процесс перемешивания электролита в ванне электролизера от ее конфигурации.

Ключевые слова: фольга, электролитическая медная фольга, получение медной фольги, SolidWorks Flow Simulation, компьютерное моделирование.

Введение

Медь занимает ведущее место среди цветных металлов за счет своих свойств, таких как высокая электропроводность, теплопроводность, пластичность, высокая химическая стойкость и возможность получения ряда ценных сплавов с другими металлами [1, 2].

Применение медной фольги можно заметить в разнообразных отраслях, таких как приборостроение, пищевая промышленность, химическая промышленность. Из медной фольги изготавливают схемы, нагревательные пленки транспорта, кабели, антенны, печатные платы и многое другое [3, 4].

Широкое использование меди в производстве печатных плат, сложной электроники и электротехники обусловлено ее хорошей проводимостью, способностью принимать на себя другие покрытия, хорошей пластичностью и, что очень важно, однородностью с

материалами металлизации трансверсальных элементов межсоединений (сквозных и глухих отверстий), которые тоже выполняются из меди [5–8].

Существует два способа производства медной фольги:

- 1) метод холодной прокатки;
- 2) метод химического электролиза.

Традиционным методом холодной прокатки возможно получить минимальную толщину фольги 50 мкм. Электролитическим же способом можно получить фольгу толщиной от 9 мкм.

Для изготовления печатных плат необходима фольга толщиной от 18 мкм, но получить тонкую медную фольгу – технически сложная задача.

Помимо получаемой толщины к уникальным свойствам электролитической фольги можно отнести и состояние поверхности. Так,

в процессе производства электролитической фольги со стороны катода фольга имеет шероховатость 0,8 мкм, а со стороны электролита – 12,5 мкм, тем самым обеспечивается высокая адгезия фольги с диэлектриком при его прессовке. Возможность нанесения различных покрытий на электролитическую фольгу делает ее еще более высокотехнологичным продуктом, что обеспечивает исключительное применение при производстве современных фольгированных диэлектриков для печатных плат любого класса сложности, а также изготовлении литий-ионных аккумуляторов [9, 10].

Для исследования электролитической фольги и параметров, влияющих на ее свойства, к которым относится состав электролита, температура электролита, плотность тока, равномерность состава электролита в области между анодом и катодом, который обеспечивается перемешиванием раствора электролита и т. д., был разработан прототип барабанного электролизера на основе существующих устройств [11–13], позволяющий получать электролитическую фольгу для ее дальнейшего исследования.

3D-модель разработанного прототипа представлена на рис. 1.

Прототип отличается от аналогов небольшими габаритами и простотой конструкции. Он позволяет в лабораторных условиях проводить исследования по электроосаждению и в дальнейшем переносить полученные закономерности на промышленное оборудование. Установка дает возможность моделировать получение фольги с различной плотностью полосы, толщиной, чистотой поверхности и др.

Катодом является вращающийся барабан из нержавеющей стали, анод может быть изготовлен из свинца, нержавеющей стали или меди. В конструкции применяется нерастворимый анод, что позволяет повысить качество фольги, улучшая структуру и снижая содержание примесей. Анод выполнен дугообразным из листа нержавеющей стали толщиной 4 мм и повторяет контур барабана, это сделано с целью того, что при такой конструкции частицы меди будут оседать по всей площади барабана, погруженной в электролит. Расстояние между анодом и катодом может варьироваться от 5 до 30 мм.

Требованием к установке является получение тонкой фольги путем электроосаждения меди на поверхность вращающегося барабана-катода. Так как этот способ подразумевает химический процесс, для осуществления которого нужна ванна с электролитом, который представляет собой серную кислоту, смешанную с медным сырьем, то в качестве сырья можно использовать медную стружку, крошку, которые обычно являются отходами. Исходя из специфики данного процесса, ванна для электролита должна быть изготовлена из материалов, устойчивых к агрессивным средам, основанным на соединении серных и соляных кислот.

На параметры фольги влияет концентрация ионов меди в пространстве между катодом и анодом [14]. Циркуляция раствора электролита обеспечивает постоянную концентрацию меди у поверхности катода. Для этого используется емкость с раствором элек-

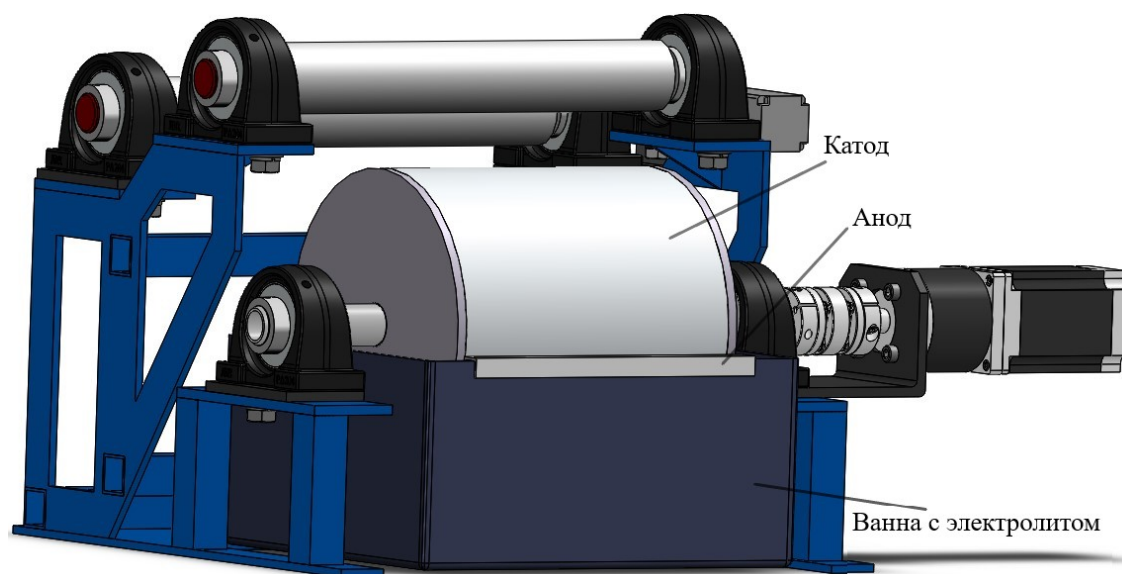


Рис. 1. 3D-модель портативной установки для получения электролитической фольги

тролита и перистальтический насос. В стенки электролизера установлены штуцеры для заполнения емкости ванны электролизера электролитом и слива электролита [1].

Целью данной работы является исследование зависимости процесса перемешивания электролита в зазоре между катодом и анодом от расположения и количества входных и сливных отверстий в ванне электролизера.

В ходе выполнения работы необходимо было решить следующие задачи:

- подготовка различных конфигураций ванны электролизера, отличающихся расположением и количеством входных и сливных отверстий;
- определение необходимых параметров потока электролита с помощью интегрированного программного пакета SolidWorks Flow Simulation;
- оценка достоверности полученных результатов.

1. Метод

Моделирование процесса проводилось в интегрированном пакете SolidWorks Flow Simulation [15, 16], включающем оценку равномерности перемешивания электролита в пространстве между катодом и анодом в зависимости от конфигурации ванны для электролита. Выбор программного обеспечения обос-

нован тем, что данная программа имеет удобный интерфейс, дает возможность построения графиков зависимости для различных характеристик потока, а также его довольно эффективно применяют для оценки потока, с целью определения рациональной конструкции, в том числе и в металлургии [17–19].

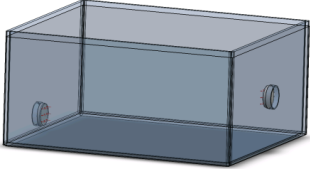



Компьютерное моделирование процесса перемешивания электролита проводилось со следующими параметрами: при нормальных условиях, при частоте вращения барабана (диаметр – 157 мм, длина – 155 мм) 1 об/мин и при шероховатости поверхности барабана Rz5, а также при объемном расходе электролита на входе и выходе – 6 л/ч (объем ванны – 4 л). В качестве электролита использовался сернокислый электролит с концентрацией 0,1 М CuSO₄ и 1,2 М H₂SO₄. Плотность раствора электролита $\rho = 1065,078$ г/л, кинематическая вязкость $\nu = 1,155$ мм²/с. Перенос вещества в электромагнитном поле не учитывался, так как к данной задаче это не имеет отношения.

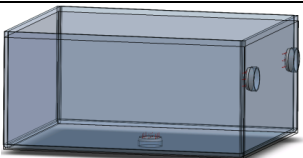
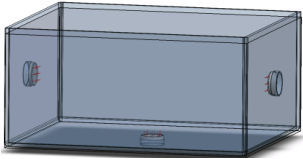
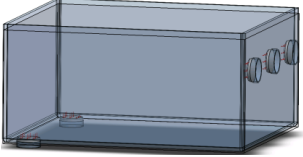
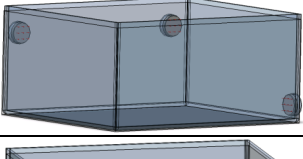
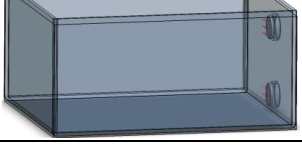
Для моделирования процесса перемешивания раствора электролита были разработаны 3D-модели нескольких конфигураций ванны электролизера. Для этого был использован программный комплекс SolidWorks 2018 [20].

В таблице представлены параметры исследуемых конфигураций ванны электролизера.

Таблица

Конфигурации ванны электролизера

№ конфигурации	Количество впускных отверстий	Количество сливных отверстий	3D-модель
1	1	1	
2			
3			
4			

№ конфигурации	Количество впускных отверстий	Количество сливных отверстий	3D-модель
5	2	1	
6			
7	3	2	
8	2	1	
9	1		

При постановке задачи на расчет во Flow Simulation в первую очередь в отверстия ванны были установлены заглушки там, где будет подаваться и отводиться электролит. После чего задавались параметры потока на входе и выходе – объемный расход. Следующим этапом была выбрана область расчета и размер сетки. Отдельно задавалось вращение барабана и шероховатость его поверхности – Rz5.

2. Результаты

Критерием оценки результатов моделирования является скорость и завихренность [19] потока электролита в пространстве между катодом и анодом. Графики зависимости скорости и завихренности потока электролита по длине барабана представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Из графиков видно, что характер изменения скорости и завихренности потока электролита по длине барабана практически одинаковый для всех конфигураций, но численные значения отличаются.

Рассмотрим процесс перемешивания электролита в ванне электролизера более подробно на примере конфигурации 2 и 3, так как

им соответствуют минимальное и максимальное значение скорости и завихренности в зазоре между катодом и анодом.

Ниже представлены картины линий тока в двух сечениях и распределение потока электролита в ванне электролизера для конфигурации 2 (рис. 4, 5) и конфигурации 3 (рис. 6, 7).

Из рис. 4 и 5 видно, что скорость потока не равномерная в разных участках ванны. У торцов и рабочей поверхности барабана скорость потока наиболее высокая, а в центральной части зазора между катодом и анодом наблюдаются «застойные области» с минимальной скоростью движения потока и с относительно малой концентрацией ионов меди вблизи катода [14]. На границах областей с высокой скоростью и областей с низкой скоростью течения жидкости образуются завихрения, что характеризует турбулентность потока электролита в данных областях.

Результаты, представленные на рис. 6 и 7 для конфигурации 3 схожи с результатами, полученными при конфигурации 2. Можно предположить, что для всех остальных рассмотренных конфигураций результаты получатся примерно такими же.

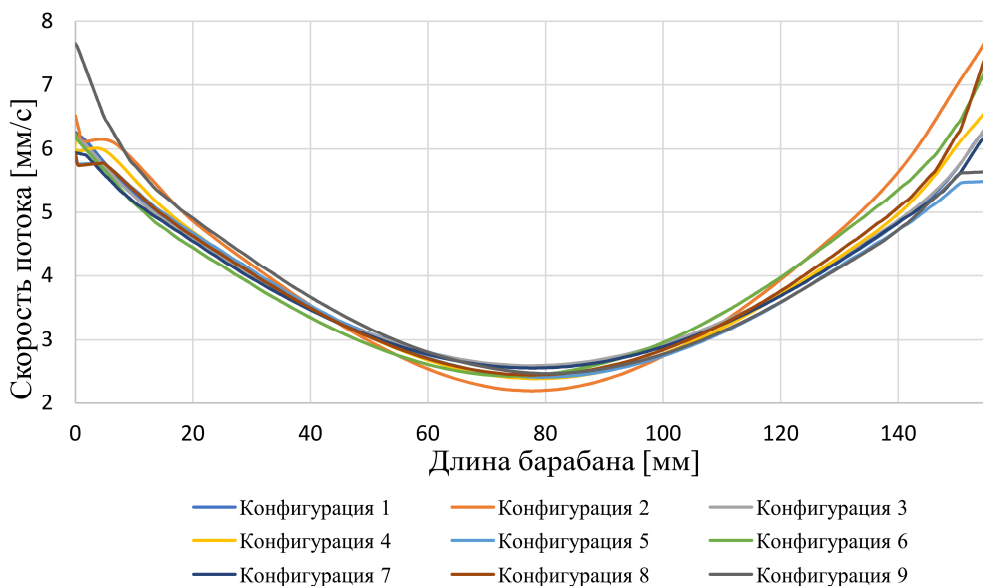


Рис. 2. Скорость потока электролита по длине барабана

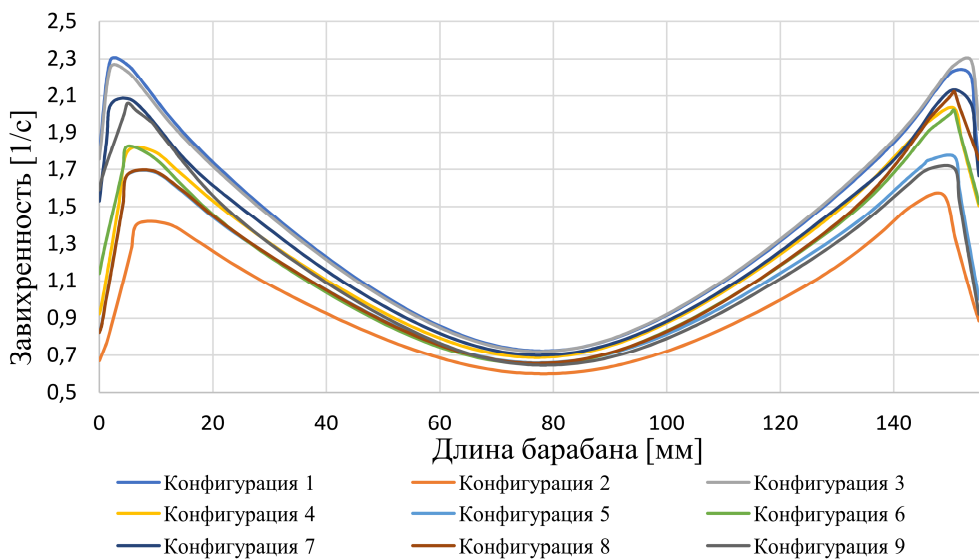


Рис. 3. Завихренность потока электролита по длине барабана

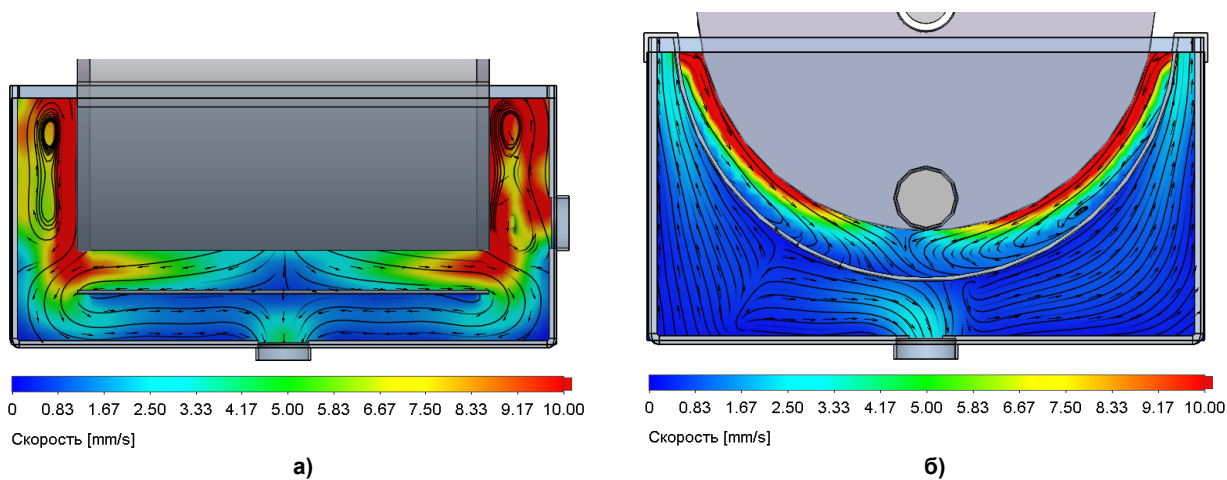


Рис. 4. Картина течения электролита в двух сечениях для конфигурации 2: а – продольное сечение; б – поперечное сечение

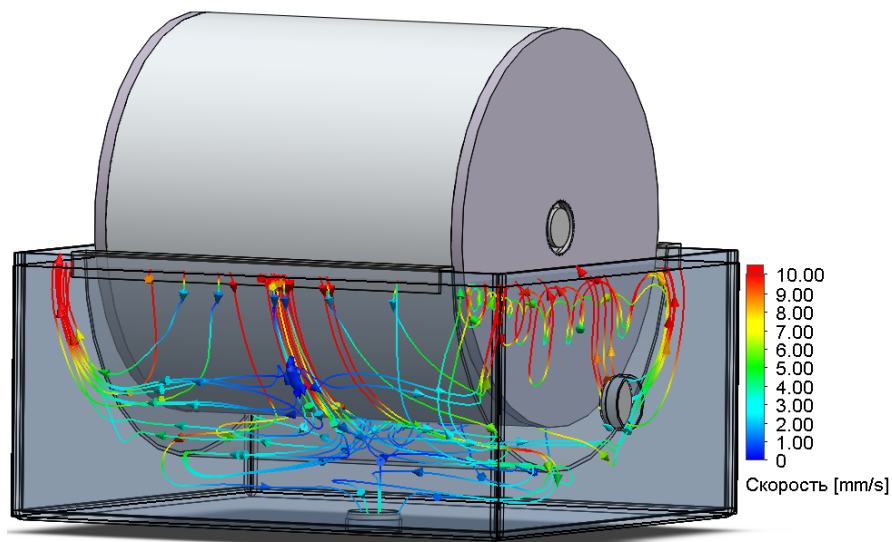


Рис. 5. Распределение потока электролита в конфигурации 2

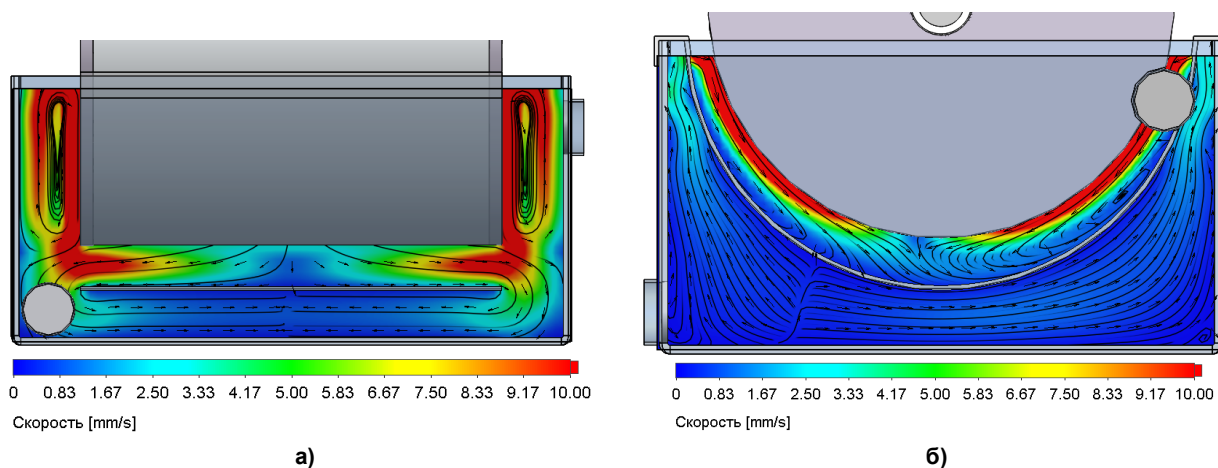


Рис. 6. Картина течения электролита в двух сечениях для конфигурации 3:
а – продольное сечение; б – поперечное сечение

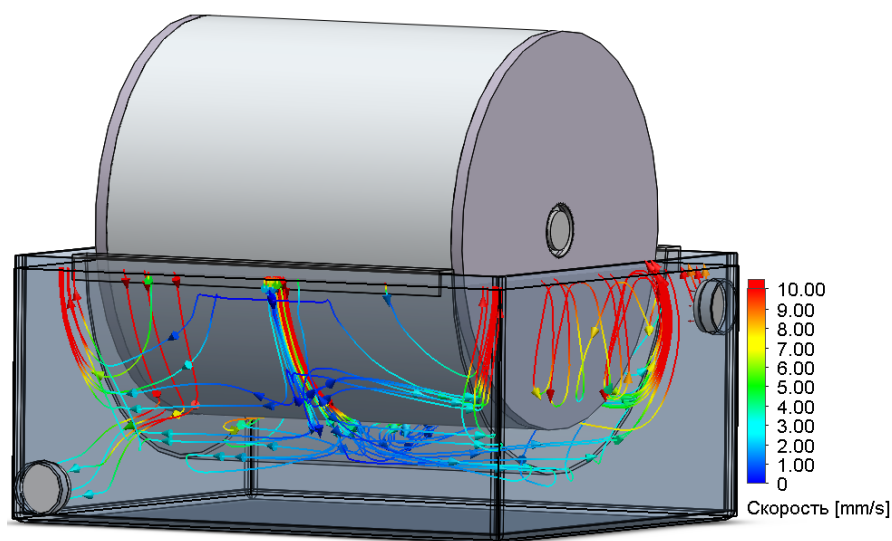


Рис. 7. Распределение потока электролита в конфигурации 3

Во всех случаях наблюдается большое количество завихрений потока электролита вблизи поверхности барабана. Предположительно это связано с тем, что барабан, вращаясь, увлекает поток за собой и создает тем самым завихрения. Также в пространстве между катодом и анодом присутствуют «застойные области», что неблагоприятно влияет на равномерность перемешивания электролита, а именно, в данных областях концентрация ионов меди будет значительно ниже.

Возможно, возникшие проблемы получится решить, варьируя другие параметры, влияющие на процесс образования электролитической фольги, например, такие как плотность тока или объемный расход на входе и

выходе. Но для этого уже необходимо проведение физического эксперимента, учитывающего все необходимые параметры.

Заключение

Сравнивая результаты моделирования, можно сделать вывод о том, что расположение впускных и сливных отверстий в ванне для электролита влияет на его перемешивание, но в большей мере на торцевых участках барабана. Подтвердить или опровергнуть полученные результаты позволит проведение физического эксперимента с использованием разработанной портативной установки для получения электролитической фольги в лабораторных условиях.

Литература

1. Свиридов, С.А. Получение медной фольги / С.А. Свиридов // *Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых им. выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Стромберга, 21–24 сентября 2020 г., г. Томск.* – Томск: Томский политехн. ун-т, 2020. – С. 450–451.
2. Свиридов, С.А. Проект участка для непрерывного получения медной фольги производительностью 80 тонн в год: диплом. проект / С.А. Свиридов. – Томск: Томский политехн. ун-т, 2021.
3. Дубровский, А.В. Импортозамещение – на пути к успеху! / А.В. Дубровский // *Композитный мир.* – 2020. – № 3. – С. 22–24.
4. Иванкова, М.В. От примитивного к совершенному: основные вехи истории печатных плат / М.В. Иванкова // *Труды международного симпозиума «Надежность и качество».* – 2020. – Т. 2. – С. 201–202.
5. Медная фольга и ее виды. – https://metallcheckiy-portal.ru/articles/cvetmet/med/mednaa_folga_i_ee_vidi.
6. *Modern polymer composite materials and their application* / A.S. Kolosova, M.K. Sokolskaya, I.A. Vitkalova et al. // *International Journal of Applied and Basic Research.* – 2018. – No. 5-1. – P. 245–256.
7. Пат. RU 0002685692 Печатная плата и способ ее получения / М.Р. Хамфриз, Ф. Фердинанди, Р.Э. Смит. – Оpubл. 23.04.2019.
8. Немонтов, В.А. *Электротехнические материалы в мехатронике: учеб. пособие* / В.А. Немонтов. – Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2021.
9. Медведев, А.М. Печатные платы. Базовые материалы. Фольги / А.М. Медведев, В.А. Можаров, Г. Мылов // *Производство электроники: Технология, оборудование, материалы.* – 2012. – № 1. – С. 12–16.
10. Богданов, Ю. Фольгированные диэлектрики – как выбрать оптимальный вариант для печатных плат ВЧ/СВЧ-диапазонов. Часть 2 / Ю. Богданов, В. Кочемасов, Е. Хасьянова // *Печатный монтаж.* – 2013. – № 3 (00044). – С. 142–147.
11. Пат. 2122049 Российская Федерация, МПК⁶ С 25 D 1/04. Медная фольга электролитического осаждения и способ ее изготовления / Дино Ф. Дифранко. – № 94037962/02; заявл. 20.10.1994; опубл. 20.11.1998. – 23 с.
12. Пат. 127078 Российская Федерация, МПК С 25 D 1/04 (2006.01). Устройство для производства медной фольги / А.И. Вольхин. – № 2012149594/02; заявл. 22.11.2012; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11. – 12 с.
13. Пат. 2366764 Российская Федерация, МПК С 25 D 1/04 (2006.01). Способы производства медной низкопрофильной фольги и низкопрофильная фольга, полученная с использованием данного

способа / Б.А. Коновалов, А.И. Вольхин, Б.Е. Екимов, И.Д. Плеханов. – № 2006126952/02; заявл. 24.07.2006; опублик. 10.09.2009. – 13 с.

14. Вахрушев, А.В. Гидродинамическое моделирование процесса совместного электрохимического осаждения на вращающийся цилиндрический электрод. Часть 3. Эволюция диффузионного слоя / А.В. Вахрушев, Е.К. Молчанов // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2014. – Т. 16, № 3. – С. 357–363.

15. Оценка работоспособности сварного соединения посредством моделирования напряженно-деформированного состояния труб лифтовых теплоизолированных / М.А. Павлова, П.Л. Копылов, Е.В. Храмов и др. // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. – 2018. – № 27. – С. 53–59.

16. Практическое руководство к программному комплексу SolidWorks Flow Simulation. Tutorial, 2009.

17. Исследование теплового поля прошивной водоохлаждаемой оправки / Н.М. Вавилкин, А.В. Белевич, Д.В. Бодров и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2010. – № 3. – С. 41–44.

18. Бодров, Д.В. Исследование теплового состояния водоохлаждаемых оправок для увеличения их износостойкости при прошивке заготовок из легированных сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Бодров. – М., 2012. – 26 с.

19. Рельефные завихрители потока для газовых двигателей компрессорных установок / Э.А. Петровский, К.А. Башмур, Ю.А. Геращенко и др. // *Экспозиция нефть газ*. – 2019. – № 4 (71). – С. 89–91.

20. <http://www.solidworks.ru>.

Носкова Мария Николаевна, магистрант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет; инженер лаборатории моделирования технологических процессов, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), г. Челябинск; noskova@rosniti.ru, ORCID ID: 0000-0002-8764-1008.

Поступила в редакцию 10 августа 2021 г.

DOI: 10.14529/met210404

ESTIMATION OF THE DEPENDENCE OF ELECTROLYTE MIXING IN A DEVELOPED PORTABLE INSTALLATION FOR PRODUCING ELECTROLYTIC FOIL

M.N. Noskova^{1,2}, noskova@rosniti.ru, ORCID ID: 0000-0002-8764-1008

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russian Federation

The article presents the results of computer simulation of the process of mixing an electrolytic solution in the developed portable installation for obtaining copper foil, intended for research purposes. Stirring the electrolytic solution during the production of copper foil by electrolysis is necessary to maintain a constant concentration of copper ions at the drum surface immersed in the electrolyte. This is one of the controlled parameters that affect the thickness and quality of the strip. Namely, due to the mixing of the electrolytic solution and thereby maintaining a constant composition of the electrolyte in the gap between the cathode and the anode, copper particles settle on the drum surface more evenly, as a result of which the foil is obtained with a more uniform structure and uniform

thickness along the entire length of the drum-cathode. This, in turn, allows you to reduce losses when forming the final width of the finished strip. As part of the work, a study was carried out of the influence of structural elements of the electrolyte container of a portable installation for obtaining electrolytic foil on the stirring of an electrolytic solution. To assess the dependence of the stirring of the electrolytic solution on the number and location of inlet and outlet holes in the electrolyzer bath. The simulation of the electrolyte mixing process was carried out in the integrated SolidWorks Flow Simulation package. For this, several configurations of the electrolyte bath were prepared, differing in the number and location of inlets and outlets. As a result of the study, it was concluded whether the process of electrolyte mixing in the electrolytic cell depends on its configuration.

Keywords: foil, electrolytic copper foil, copper foil production, SolidWorks Flow Simulation, computer simulation.

References

1. Sviridov S.A. [Obtaining copper foil]. *Chemistry and chemical technology in the XXI century: materials of the XXI International scientific-practical conference of students and young scientists named after prominent chemists L.P. Kuleva and N.M. Kizhner dedicated to the 110th anniversary of the birth of Professor A.G. Stromberg, September 21–24, 2020, Tomsk*, Tomsk Polytechnic University, 2020, pp. 450–451. (in Russ.)
2. Sviridov S.A. *Proyekt uchastka dlya nepreryvnogo polucheniya mednoy fol'gi proizvoditel'nost'yu 80 tonn v god: diplom. proyekt* [Project of a site for continuous production of copper foil with a capacity of 80 tons per year]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2021.
3. Dubrovsky A.V. [Import substitution – on the way to success!]. *Composite world*, 2020, no. 3, pp. 22–24. (in Russ.)
4. Ivankova M.V. [From the primitive to the perfect: the main milestones in the history of printed circuit boards]. *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2020, vol. 2, pp. 201–202. (in Russ.)
5. *Mednaya fol'ga i ee vidy* [Copper foil and its types]. Available at: https://metallicheckiy-portal.ru/articles/cvetmet/med/mednaa_folga_i_ee_vidi.
6. Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. Modern polymer composite materials and their application. *International Journal of Applied and Basic Research*, 2018, no. 5-1, pp. 245–256.
7. Humphries M.R., Ferdinandi F., Smith R.E. *Pechatnaya plata i sposob ee polucheniya* [Printed circuit board and how to obtain it]. Patent RU 0002685692, 2019.
8. Nemontov V.A. *Elektrotekhnicheskiye materialy v mekhatronike: ucheb. posobiye* [Electro-technical materials in mechatronics: a tutorial]. Vladimir, Vladimir State University Publ., 2021.
9. Medvedev A.M., Mozharov V.A., Mylov G. [Printed circuit boards. Basic materials. Foil]. *Electronics Manufacturing: Technology, Equipment, Materials*, 2012, no. 1, pp. 12–16. (in Russ.)
10. Bogdanov Yu., Kochemasov V., Khasyanova E. [Foil dielectrics – how to choose the best option for printed circuit boards of HF/microwave ranges. Part 2]. *Printed montage*, 2013, no. 3 (00044), pp. 142–147. (in Russ.)
11. Dino F. Difranko. *Mednaya fol'ga elektroliticheskogo osazhdeniya i sposob ee izgotovleniya* [Copper foil electrolytic deposition and method of its production]. Patent RF, no. 2122049, 1998.
12. Volkhin A.I. *Ustroystvo dlya proizvodstva mednoy fol'gi* [Device for the production of copper foil]. Patent RF, no. 127078, 2013.
13. Konovalov B.A., Volkhin A.I., Ekimov B.E., Plekhanov I.D. *Sposoby proizvodstva mednoy nizkopofil'noy fol'gi i nizkopofil'naya fol'ga, poluchennaya s ispol'zovaniyem dannogo sposoba* [Methods for the production of low-profile copper foil and low-profile foil obtained using this method]. Patent RF, no. 2366764, 2009.
14. Vakhrouchev A.V., Molchanov E.K. Hydrodynamic modeling of electrocodeposition on a rotating cylinder electrode. Part 3. Development of the diffusion layer. *Chemical Physics and Mesoscopy*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 357–363. (in Russ.)
15. Pavlova M.A., Kopylov P.L., Khramkov E.V., Akhmerov D.A., Kochkin A.S., Pugin A.I. [Evaluation of the performance of a welded joint by means of modeling the stress-strain state of heat-insulated lift pipes]. *Modeling and development of metal forming processes*, 2018, no. 27, pp. 53–59. (in Russ.)

16. A practical guide to the software package SolidWorks Flow Simulation. Tutorial, 2009.
17. Vavilkin N.M., Belevich A.V., Bodrov D.V. et al. [Investigation of the thermal field of a pierced water-cooled mandrel]. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2010, no. 3, pp. 41–44. (in Russ.)
18. Bodrov D.V. *Issledovaniye teplovogo sostoyaniya vodookhlazhdayemykh opravok dlya uvelicheniya ikh iznosostoykosti pri proshivke zagotovok iz legirovannykh staley: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Investigation of the thermal state of water-cooled mandrels to increase their wear resistance when piercing workpieces from alloyed steels. Abstract of cand. sci. diss.]. Moscow, 2012. 26 p.
19. Petrovsky E.A., Bashmur K.A., Gerashchenko Yu.A., Makolov V.A., Shadchina Yu.N. Relief swirlers for gas engine-compressor units. *Exposition of oil and gas*, 2019, – no. 4 (71), pp. 89–91. (in Russ.)
20. Available at: <http://www.solidworks.ru>.

Received 10 August 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Носкова, М.Н. Оценка зависимости перемешивания электролита в разработанной портативной установке для получения электролитической фольги / М.Н. Носкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 31–40. DOI: 10.14529/met210404

FOR CITATION

Noskova M.N. Estimation of the Dependence of Electrolyte Mixing in a Developed Portable Installation for Producing Electrolytic Foil. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 31–40. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210404