

KỸ THUẬT - CÔNG NGHỆ**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ MẠ ĐẾN QUÁ TRÌNH MẠ ĐỒNG DÙNG PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI**

**PHAN THANH TÙNG¹, TRƯƠNG CÔNG NAM¹, LÊ TIẾN ĐẠT¹,
TRẦN HỒNG VĂN², NGUYỄN KHOA TRIỀU^{3,*}**

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu hoạt động của thiết bị mạ điện dùng phương pháp Taguchi. Mạ điện là một quá trình quan trọng, trang trí, đồng thời chống ăn mòn, mài mòn cho sản phẩm bằng cách phủ một lớp kim loại lên chúng. Đầu tiên, những công trình nghiên cứu trước đây về quy trình mạ điện và thiết bị mạ điện cỡ nhỏ được tổng hợp và phân tích. Những ưu nhược điểm của các thiết bị này được phân tích một cách cụ thể và chi tiết để có thể tìm ra phương án thiết kế và chế tạo phù hợp. Các tác giả đã xác định được 03 điều kiện quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt sản phẩm mạ, bao gồm thời gian mạ, cường độ dòng điện và nhiệt độ. Đồng thời, một thiết bị mạ điện cỡ nhỏ cũng đã được thiết kế và chế tạo cho các thử nghiệm. Kết quả nghiên cứu bước đầu dùng phương pháp Taguchi cho thấy mức độ ảnh hưởng của các thông số đầu vào lên kết quả bề dày lớp mạ. Đây sẽ là những thông số quan trọng cho quá trình chế tạo thiết bị mạ điện quy mô công nghiệp.

Từ khoá: mạ điện, phương pháp Taguchi, mạ đồng, phủ kim loại, bề dày lớp mạ.
Abstract

This paper presents the results of studying the operation of a lab-scale electroplating equipment using the Taguchi method. Electroplating is an important process, decorative, and at the same time prevents corrosion and abrasion of products by coating them with a thin layer of metal. First, previous studies on electroplating processes and lab-scale electroplating devices were synthesized and analyzed. The advantages and disadvantages of these devices were analyzed in detail so that an appropriate design and fabrication option could be found. Three important conditions that affect the surface quality of plating products, including plating time, amperage, and temperature were identified. At the same time, a lab-scale electroplating device was also designed and built for the tests. Initial study results using the Taguchi method showed the influence of the input factors on the results of coating thickness. These will be important parameters for the fabrication of industrial-scale electroplating devices.

Keywords: electroplating, Taguchi method, copper plating, metallization, plating thickness.

¹ Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Cửu Long

² Khoa Công nghệ Tự động, Trường Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức

³ Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

* Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Khoa Triều (Email: nguyengkhoatrieu@iuh.edu.vn)

1. Giới thiệu

Mạ điện là một quá trình sử dụng dòng điện để khử các kim loại hòa tan (cations - các ion tích điện dương) để chúng tạo thành một lớp phủ kim loại kết dính mỏng trên điện cực. Mạ một vật thể làm cho nó cứng hơn và cải thiện khả năng chống ăn mòn của vật liệu. Mạ điện có thể được sử dụng để tạo lớp phủ bảo vệ cho các vật liệu sẽ được sử dụng trong lĩnh vực cơ khí cũng như y tế. Quá trình mạ điện diễn ra nhanh chóng và hiệu quả nếu nguồn điện bên ngoài là đầy đủ. Lớp phủ kim loại được tạo ra bằng phương pháp này đủ mịn và dày để bảo vệ vật liệu khỏi bị hư hại [1].

Vì tầm quan trọng đó, sau khi được chính thức phát minh bởi nhà hóa học ý Luigi V. Brugnatelli vào năm 1805 [2], mạ điện đã được nghiên cứu rộng rãi. Le và các cộng sự đến từ Viện Công nghệ Nano, Đại học quốc gia Tp. Hồ Chí Minh đã nghiên cứu tối ưu hóa quá trình mạ đồng lên nền nhựa PET (PolyEthylene Terephthalate) [3]. Đây là một nền tảng quan trọng để phát triển các thiết bị điện tử uốn dẻo được (flexible electronic devices). Tuy nhiên, nhược điểm của nghiên cứu này là chỉ có bốn thí nghiệm được thực hiện với hai nhân tố đầu vào. Để khắc phục điều này, Hsu và các cộng sự dùng phương pháp Taguchi và phân tích phương sai ANOVA nghiên cứu quá trình mạ đồng [4]. Tương tự như vậy, Park và các cộng sự cũng dùng phương pháp Taguchi để nghiên cứu quá trình mạ đồng [5]. Các tác giả này nghiên cứu về dung dịch mạ, cường độ dòng điện và thời gian mạ. Cũng dùng phương pháp Taguchi, Rosyadi và các cộng sự nghiên cứu quá trình mạ crôm lên thép [6]. Các nghiên cứu này cho thấy Taguchi là phương pháp

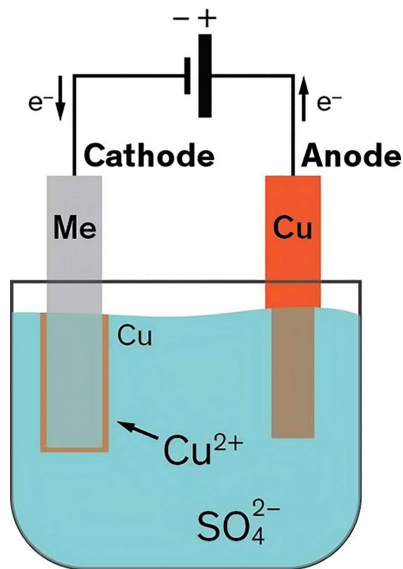
đơn giản, dễ thực hiện, nhưng nhược điểm là phương pháp rời rạc, kết quả đầu ra bị giới hạn bởi các mức đầu vào của các nhân tố. Tiếp theo, để giải quyết vấn đề này, Suryanto và các cộng sự [7] dùng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM - Response Surface Methodology) để nghiên cứu độ bền của lớp mạ đồng. Mô hình toán mà học đưa ra có thể dự đoán được độ dày lớp mạ, nhưng quá phức tạp để có thể được sử dụng trong thực tiễn công nghiệp. Hơn nữa, tối ưu hóa tô-pô được sử dụng cùng với mô phỏng để nghiên cứu quá trình mạ điện nói chung [8]. Nhưng cũng như nghiên cứu trên, mô hình toán đưa ra là quá phức tạp. Các thuật toán khác như mạng thần kinh nhân tạo (ANN - artificial neural network) [9], NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) [10], hay các mô hình toán tự phát triển khác [11] cũng được sử dụng để nghiên cứu các quá trình mạ kim loại dùng phương pháp mạ điện. Nhưng đặc điểm chung của các nghiên cứu này là tính thực tiễn không cao.

Kỹ thuật mạ điện vốn được hướng tới ứng dụng trong công nghiệp và trong trang trí, kể cả trang sức [12]. Do đó, qua khảo sát, phương pháp Taguchi được xem là phù hợp nhất cho nghiên cứu ở quy mô phòng thí nghiệm cũng như cho các kỹ sư tại xưởng nghiên cứu quy trình công nghệ vận hành thiết bị sau này.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp mạ điện

Khái niệm về mạ điện đồng rất đơn giản: Những vật cần mạ vào bể điện phân, nối điện và các ion đồng sẽ di chuyển từ cực dương (anode) và lắng đọng trên cực âm (cathode) [13]. Quá trình này được trình bày trong Hình 1.



Hình 1. Quá trình mạ điện cho đồng

Mạ đồng là một trong những kỹ thuật mạ phổ biến và ứng dụng nhiều nhất. Mạ đồng dày trên thép để tăng độ dẫn điện trong khi tiết kiệm được vật liệu đồng. Mạ đồng trên bạc để là giảm ma sát. Mạ đồng còn dùng để bảo vệ chi tiết khỏi bị thấm than trong quá trình nhiệt luyện. Ngoài ra, lớp mạ đồng còn là lớp trung gian cho các lớp mạ tiếp theo như mạ niken, chrom, ... Lớp đồng trung gian không có lỗ xốp, nâng cao độ bền ăn mòn, độ bám chắc lớp mạ [14]. Do đó, mạ đồng đã được chọn cho nghiên cứu này. Có nhiều dung dịch mạ đồng như dung dịch xyanua, đồng sunfat, pyro photphat, floroborat, ... [15]. Trong đó, dung dịch đồng sunfat được chọn vì phổ biến và ít độc hại.

2.2. Phương pháp Taguchi

Ngày nay, phương pháp Taguchi ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong quy hoạch thực nghiệm [16]. Phương pháp này góp phần nâng cao năng suất trong quá trình nghiên cứu và phát triển, tạo ra sản phẩm chất lượng cao với chi phí thấp. TS. Taguchi đã phát triển một phương pháp dựa trên thí nghiệm mảng

trực giao để giảm số lượng thí nghiệm với sự sắp xếp phù hợp các điều kiện thuận lợi nhất của các tham số có thể kiểm soát [17]. Các mảng trực giao tạo ra sự cân bằng giữa các thí nghiệm. Và tỷ số Signal-to-Noise (S/N) là một hàm logarit của đầu ra mong muốn, đáp ứng mục đích tối ưu hóa, thực hiện phân tích và dự đoán kết quả. Trong phương pháp Taguchi, thuật ngữ “Tín hiệu - Signal” đề cập đến giá trị trung bình (giá trị mong muốn) của mục tiêu đầu ra và thuật ngữ “Nhiều - Noise” là giá trị không mong muốn [18]. Do đó, tỷ số S/N được sử dụng để tính độ lệch so với giá trị mong muốn. Sau đây là các công thức để tính tỷ số S/N [19]:

- Lớn hơn là tốt hơn:

$$S/N = -10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (1)$$

- Nhỏ hơn là tốt hơn:

$$S/N = -10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum (y_i^2) \right] \quad (2)$$

Thiết kế thí nghiệm bằng phương pháp Taguchi hiệu quả hơn so với các phương pháp thống kê khác. Thông qua việc lựa chọn phù hợp các biến độc lập khác nhau, số lượng thí nghiệm giảm đáng kể. Ngoài ra, không có bất kỳ thông tin nào bị mất do giảm số lượng thí nghiệm. Mục tiêu của phương pháp Taguchi là giảm thiểu sự thay đổi xung quanh mục tiêu và cải thiện chất lượng. Sử dụng kỹ thuật này cho phép các nhà khoa học, kỹ sư và nhà nghiên cứu dành ít thời gian hơn cho việc lập kế hoạch thử nghiệm và phân tích kết quả. Với những cải tiến trong công nghệ máy tính, việc sử dụng phương pháp Taguchi trong các ứng dụng trở nên dễ dàng hơn. Phổ biến nhất là phân tích kỹ thuật bằng phần mềm máy tính, chẳng hạn như Minitab.

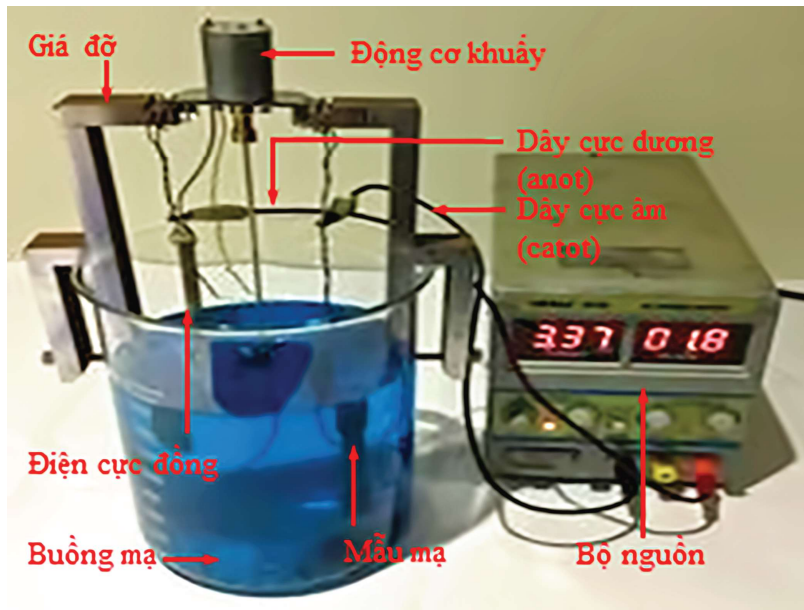
3. Kết quả và thực nghiệm

3.1. Lựa chọn các yếu tố và mảng trực giao

Thiết bị mạ điện dùng cho thí nghiệm này được trình bày trong Hình 2. Đây là một thiết bị mạ điện ở quy mô phòng thí nghiệm

với hai đồ gá hai bên và một động cơ khuấy ở giữa. Dung dịch mạ ở đây là đồng sunfat.

Thông qua việc khảo sát các tài liệu tham khảo và các thí nghiệm tiền khả thi, ba yếu tố đầu vào với ba mức được trình bày trong Bảng 1.



Hình 2. Thiết bị mạ điện

Bảng 1: Các yếu tố đầu vào

Các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dày lớp mạ	Mức 1	Mức 2	Mức 3
Thời gian t (phút)	10	15	20
Cường độ dòng điện I (A)	1.5	2	2.5
Nhiệt độ T (°C)	25	30	35

Việc xây dựng mảng trực giao dựa trên số yếu tố và số bậc của mỗi yếu tố. Trong nghiên cứu hiện tại, với 3 yếu tố, mỗi yếu tố 3 mức,

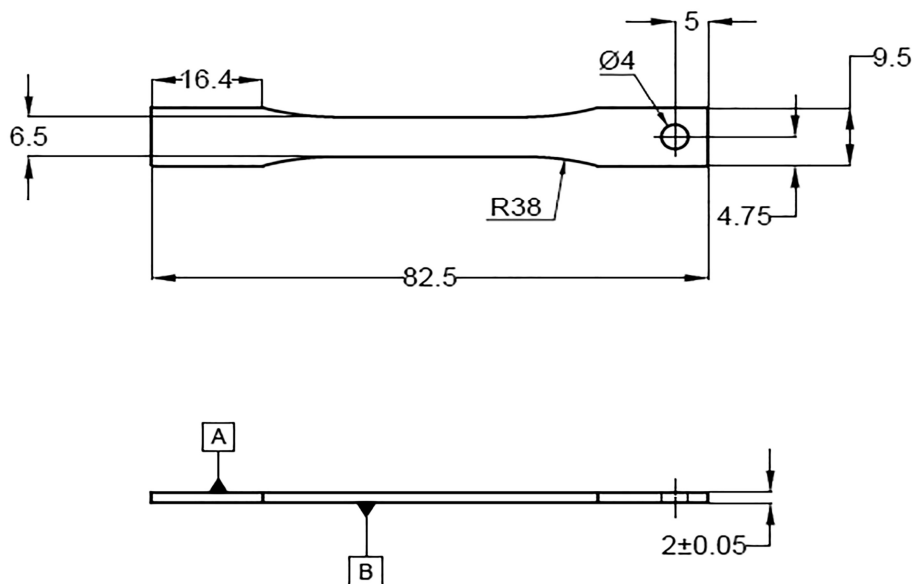
mảng trực giao (orthogonal array - OA) có cấu trúc L_9 như trong Bảng 2. Theo đó, có tổng cộng 9 thí nghiệm được thực hiện lần lượt.

Bảng 2: Bảng quy hoạch thực nghiệm

Thí nghiệm	t	I	T
1	10	1.5	25
2	10	2	30
3	10	2.5	35

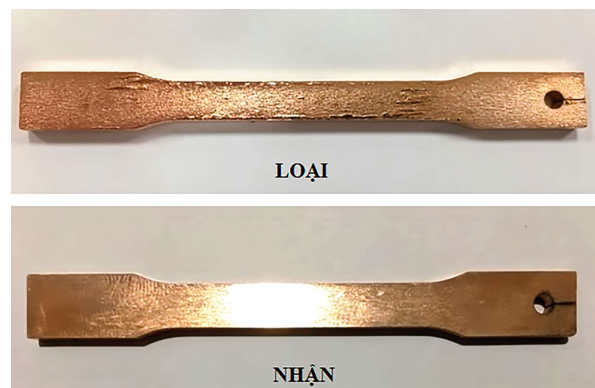
4	15	1.5	30
5	15	2	35
6	15	2.5	25
7	20	1.5	35
8	20	2	25
9	20	2.5	30

Các kích thước của mẫu thép C45 dùng cho các thí nghiệm mạ đồng được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Kích thước của mẫu thép dùng cho thí nghiệm mạ

Các mức trong Bảng 1 được lựa chọn dựa trên khác thí nghiệm tiền khả thi. Khi cường độ dòng điện và nhiệt độ mạ ở phạm vi ngoài các khoảng trên, mẫu mạ hay bị giảm chất lượng bề mặt như trong Hình 4. Ngoài ra, sản phẩm mạ còn được kiểm tra khả năng bám dính bằng băng keo. Cả băng keo trong và băng keo giấy đã được sử dụng. Kết quả cho thấy ngoài một số tinh thể đồng nhỏ không đáng kể bám lên bề mặt băng keo thì không có hiện tượng bong tróc. Điều này cho thấy lớp mạ có độ bám dính đạt yêu cầu.

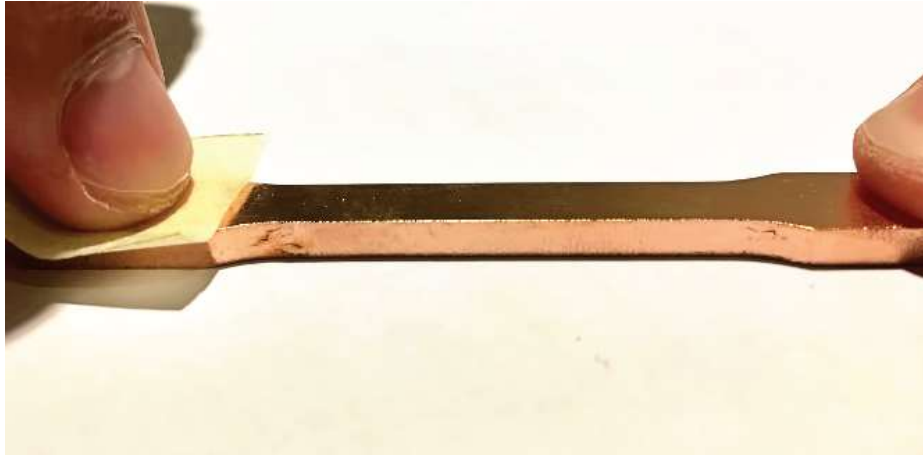


Hình 4. Sản phẩm mạ trong các thí nghiệm tiền khả thi

3.2. Kết quả thí nghiệm

Căn cứ vào Bảng 2, tổng cộng 9 thí nghiệm đã được thực hiện. Hình 5 trình bày một sản phẩm mạ. Chiều dày sản phẩm mạ

trước và sau khi mạ được đo bằng thước panme điện tử. Bảng 3 trình bày kết quả trung bình của kích thước chiều dày của 3 điểm bất kì của mẫu trước, sau khi thí nghiệm và chiều dày lớp mạ.



Hình 5. Sản phẩm mạ

Bảng 3: Kết quả thực nghiệm

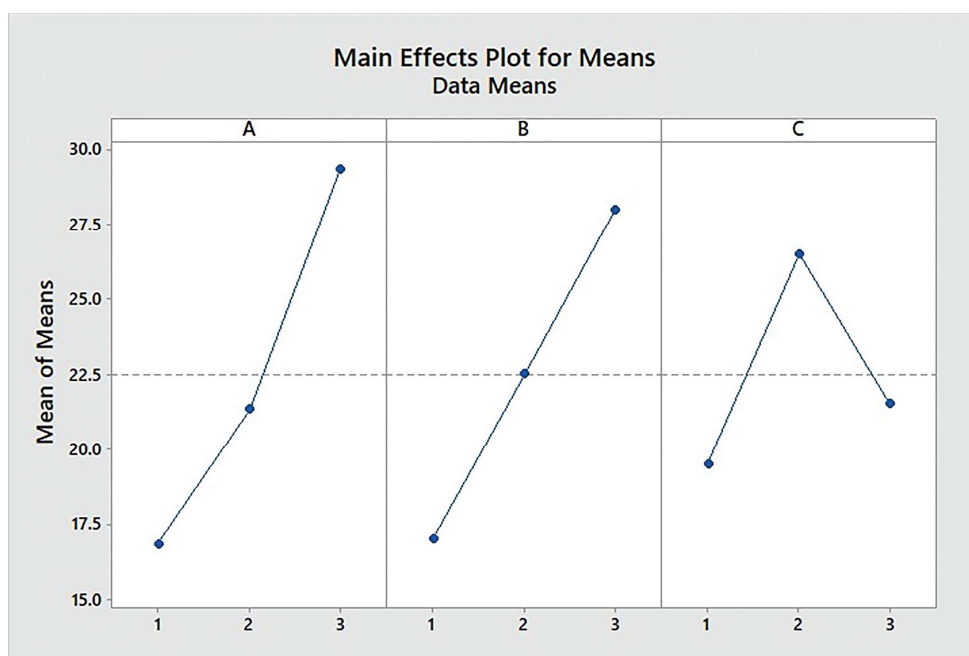
Thí nghiệm	Kích thước trước khi mạ (mm)	Kích thước sau khi mạ (mm)	Chiều dày lớp mạ (μm)
1	1.968	1.989	10.5
2	1.969	2.007	19
3	1.965	2.007	21
4	1.956	1.995	19.5
5	1.968	2.013	22.5
6	1.971	2.015	22
7	1.969	2.011	21
8	1.968	2.020	26
9	1.966	2.048	41

Kết quả chiều dày trung bình của lớp mạ trong Bảng 3 sau đó được phân tích bằng phần mềm Minitab. Kết quả phân tích giá trị trung

bình theo từng mức của yếu tố đầu vào được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4 : Kết quả phân tích giá trị trung bình theo từng mức của các yếu tố

Level	A	B	C
1	16.83	17.00	19.50
2	21.33	22.50	26.50
3	29.33	28.00	21.50
Delta	12.50	11.00	7.00
Rank	1	2	3

**Hình 6. Trung bình của từng mức theo từng yếu tố đầu vào**

Hình 6 trình bày trung bình của từng mức theo từng yếu tố đầu vào.

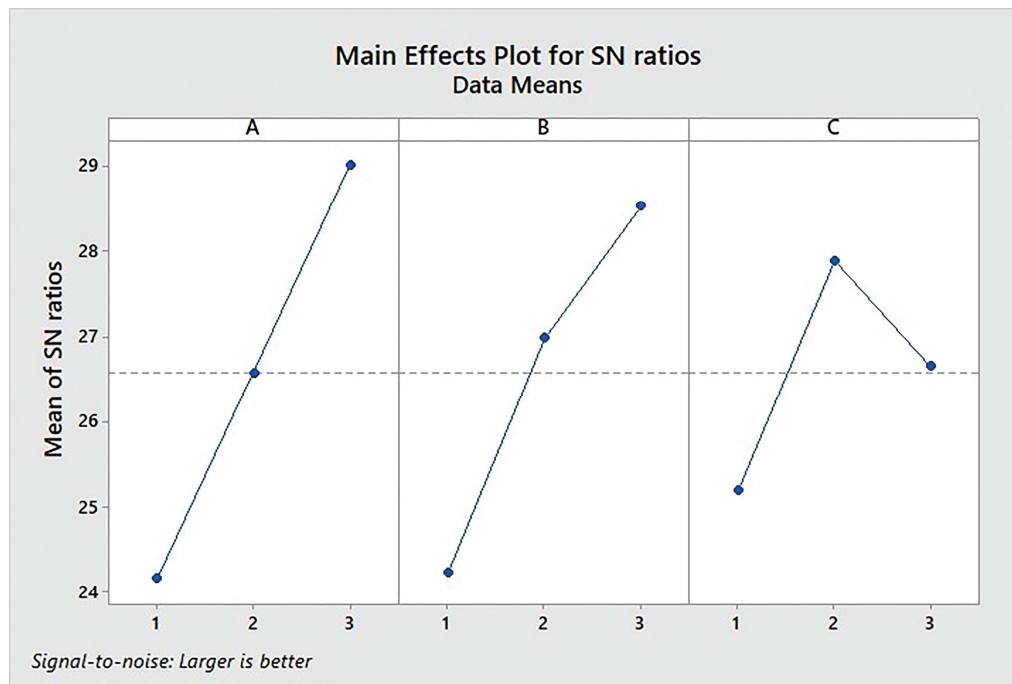
Vì kết quả chiều dày lớp mạ càng dày

càng tốt, công thức (1) được sử dụng để tính tỷ số S/N. Kết quả tính tỷ số S/N cho từng mức của từng yếu tố được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 4: Kết quả tính tỷ số S/N cho từng mức của các yếu tố

Level	A	B	C
1	24.15	24.22	25.19
2	26.56	26.97	27.88
3	29.00	28.52	26.64
Delta	4.85	4.29	2.69
Rank	1	2	3

Hình 6 trình bày giá trị tỷ số S/N của từng mức theo từng thông số đầu vào.



Hình 7. Giá trị của tỷ số S/N của từng mức cho từng yếu tố đầu vào

Kết quả tỷ số S/N cho thấy, thông số nào có độ biến thiên nhiều nhất sẽ có ảnh hưởng nhiều nhất tới kết quả đầu ra. Hình 5 cho thấy thời gian mạ có ảnh hưởng nhiều nhất tới chiều dày lớp mạ. Thời gian mạ càng dài thì chiều dày lớp mạ càng tăng. Tương tự như vậy, cường độ dòng điện I là yếu tố quan trọng thứ hai. Cường độ dòng điện đồng biến với kết quả chiều dày lớp mạ. Trong khi đó, nhiệt độ mạ T ảnh hưởng ít nhất tới chiều dày lớp mạ. Nhiệt độ cũng không nên quá cao, cũng không nên quá thấp. Nhiệt độ 30 °C là phù hợp cho việc mạ đồng bằng dung dịch đồng sunfat. Ngoài ra, sự thống nhất của hai kết quả giá trị trung bình của từng mức trong Hình 6 và giá trị tỷ số S/N trong Hình 7 cũng cho thấy sự phù hợp của các kết quả thí nghiệm.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, phương pháp Taguchi được sử dụng để phân tích ảnh hưởng của các thông số đầu vào tới kết quả đầu ra là chiều dày lớp mạ. Qua khảo sát các công trình

đã công bố và từ các thí nghiệm tiền khả thi, thời gian mạ, cường độ dòng điện và nhiệt độ mạ là ba yếu tố có ảnh hưởng lớn tới kết quả bề dày lớp mạ. Qua các phân tích của phần mềm Minitab, thời gian mạ là yếu tố quan trọng nhất. Thời gian mạ càng dài thì lớp mạ càng dày. Và cường độ dòng điện càng cao thì chiều dày lớp mạ càng tăng. Trong khi đó, nhiệt độ của dung dịch mạ nên duy trì ở 30 °C. Đây là những thông tin quan trọng cho việc tối ưu hóa quá trình mạ, điều khiển chiều dày lớp mạ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. S. Hamdy Makhoul and R. Rodriguez, "Chapter 15 - Bioinspired smart coatings and engineering materials for industrial and biomedical applications," in *Advances in Smart Coatings and Thin Films for Future Industrial and Biomedical Engineering Applications*, A. S. H. Makhoul and N. Y. Abu-Thabit, Eds., ed: Elsevier, 2020, pp. 407-427.
- [2] C. Raub, "Chapter 23 - The history of

- electroplating,” in *Metal Plating and Patination*, S. L. Niece and P. Craddock, Eds., ed: Butterworth-Heinemann, 1993, pp. 284-290.
- [3] N. N. Le, T. C. Hue Phan, A. D. Le, T. M. Dung Dang, and M. C. Dang, “Optimization of copper electroplating process applied for microfabrication on flexible polyethylene terephthalate substrate,” *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 6, p. 035007, 2015.
- [4] C.-F. Hsu, W.-P. Dow, H.-C. Chang, and W.-Y. Chiu, “Optimization of the Copper Plating Process Using the Taguchi Experimental Design Method: I. Microvia Filling by Copper Plating Using Dual Levelers,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 162, p. D525, 2015.
- [5] B.-G. Park, S. G. Kim, and J. S. Ko, “A Study on the Optimization of Electroplating Conditions for Silicon Vias Using the Taguchi Experimental Design Method,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 20, pp. 437-442, 2019.
- [6] A. Rosyadi, F. Gustiawan, M. Darsin, Y. Hermawan, and M. Asrofi, “Optimization of electroplating thickness results for SS400 steel using the Taguchi method,” *Jurnal POLIMESIN*, vol. 20, pp. 121-127, 2022.
- [7] Suryanto, F. I. Haider, M. H. Ani, and M. H. Mahmood, “Modelling and Optimization of Copper Electroplating Adhesion Strength,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 204, p. 012017, 2017.
- [8] N. Ishizuka, T. Yamada, K. Izui, and S. Nishiwaki, “Topology optimization for unifying deposit thickness in electroplating process,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 62, pp. 1767-1785, 2020.
- [9] W. Sassi, M. Mrad, D. Behera, S. Ammar, and J.-Y. Hihn, “Prediction and optimization of electroplated Ni-based coating composition and thickness using central composite design and artificial neural network,” *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 51, pp. 1591-1604, 2021.
- [10] R. Katirci and K. I. Danaci, “The optimization of nickel electroplating process parameters with artificial intelligence methods,” *Journal of Applied Electrochemistry*, 2023.
- [11] D. Solovjev, I. Solovjeva, and V. Konkina, “Mathematical modelling and optimization of the electroplating process with a rotating cathode to reduce the non-uniformity of the coating thickness,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 298, p. 00014, 2019.
- [12] W. Giurlani, G. Zangari, F. Gambinossi, M. Passaponti, E. Salvietti, F. Benedetto, et al., “Electroplating for Decorative Applications: Recent Trends in Research and Development,” *Coatings*, vol. 8, p. 260, 2018.
- [13] N. V. Loc, *Công nghệ mạ điện: Educational Publishers*, 2005.
- [14] N. V. Loc, *Sổ tay công nghệ mạ điện: Bach Khoa Ha Noi Publishers*, 2011.
- [15] T. M. Hoang, *Công nghệ mạ điện: Scientific and technical publisher*, 2001.
- [16] T. K. Nguyen, M. Q. Chau, T.-C. Do, and A.-D. Pham, “Characterization of geometrical parameters of plastic

bottle shredder blade utilizing a two-step optimization method,” *Archive of Mechanical Engineering*, vol. vol. 68, pp. 253-269, 2021.

- [17] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, “Quality Engineering: The Taguchi Method,” in *Taguchi’s Quality Engineering Handbook*, ed, 2004, pp. 56-123.
- [18] T. K. Nguyen, C. J. Hwang, and B.-K. Lee, “Numerical investigation of warpage

in insert injection-molded lightweight hybrid products,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 18, pp. 187-195, 2017.

- [19] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, “Introduction to the Signal-to-Noise Ratio,” in *Taguchi’s Quality Engineering Handbook*, ed, 2004, pp. 221-238.

Ngày nhận bài: 22/05/2023

Ngày gửi phản biện: 25/05/2023

Ngày duyệt đăng: 21 /6/2023