



## Original Research Article - Extended Abstract

# Synthesis of Porous Nickel Foam Based on Electroless Plating on Polymeric Substrate and Electrodeposition

Masoomeh Zafardoagoo<sup>1</sup>, Sayed Khatiboleslam Sadrnezhad<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Ph. D. Student, Department of Materials Science and Engineering, International Campus, Sharif University of Technology, Kish Island, Hormozgan, Iran<sup>2</sup> Professor, Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Tehran, Iran\*Corresponding Author's Email: [sadrnezh@sharif.edu](mailto:sadrnezh@sharif.edu) (S. Kh. Sadrnezhad)**Paper History:**

Received: 2022-01-19

Revised in revised form: 2022-02-10

Scientific Accepted: 2022-02-14

**Keywords:**Porous Nickel,  
Open Cell Foam,  
Electroless,  
Electrodeposition,  
Pyrolysis

**Abstract** The main objective of the current study was to synthesize porous nickel foam through a cost-effective method and study its novel applications. Several characteristics such as a mix of mechanical and physical properties with low density, high fluid permeability, and thermal conductivity have made synthesis methods of metal foams attractive in specific applications for researchers compared to polymers or ceramics foams. Foams are either open or closed cells that mainly affect the material properties and end usage. Wide applications of metallic foams in electrodes, heat exchangers, and filters and nickel foams in battery electrodes and catalysts for hydrogen production as clean energy sources are increasingly investigated nowadays. In this regard, the current study aimed to investigate open cell nickel foams synthesized through multi chemical processes including degreasing, roughening, sensitization, and activation methods to nickel deposition over non-conductive polyurethane. To this end, a thicker layer was coated by hard nickel electrodeposition. Then, polyurethane substrate was removed by pyrolysis in a tube furnace with pure argon gas flow. The characteristics of the nickel coatings were studied using X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), metallography, and measurement of specific surface area (BET). In the Nickel foam, the compression strength of the electroless foam was calculated as 0.07 MPa and for the electrodeposited foam, this value increased up to 1.1 MPa. In addition, its hardness was measured as 145 Vickers Hardness (Hv).

<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.325426.1210>URL: [https://www.jamt.ir/article\\_144797.html](https://www.jamt.ir/article_144797.html)

## 1. INTRODUCTION

Numerous studies have been carried out on the fabrication methods of open cell metal foams in the last decades. Such studies are mainly divided into four production methods namely the casting, metallurgy powder, metal vapor deposition, and ion deposition (electrodeposition) [1]. In addition, some new categories that are also expensive methods of mass production of metal foams such as spark plasma sintering [2] and sintering and dissolution process [3] can be added to the list. Metal foams such as aluminum, nickel, copper, and their alloys are used in different industries such as filters, battery electrodes, heat exchangers, catalysts, etc. [4-6]. Compared to polymer and ceramic foams, metal foams are characterized by several advantageous properties namely the low density, high thermal conductivity, high thermal shock resistance, and high mechanical strength [6, 7]. The properties of such foams directly depend on the main metal, relative density, and size as well as topology (either open or closed) of the pores [7-9]. Fabrication methods also directly affect the foam properties and costs [5, 10]. The present research aimed to synthesize open cell nickel foam based on a cost-effective method using electroless deposition over polymeric sponge. Then, hard nickel was electrodeposited, and the polyurethane substrate was

removed by a controlled pyrolysis and high pure argon gas flow.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In this study, first, the purchased open-cell polyurethane foam, i.e., 40 ppi, became conductive with the electroless nickel thickness of 2-5  $\mu\text{m}$  coated by multi-step processes including the degreasing, etching, sensitization, activation, and electroless nickel plating. Next, the specimen was completely washed in the distilled water after each step and then dried. After that, the electroplating method was applied to continue depositing a layer of nickel on the former nickel coated by electroless. In this step, the foam was nickel-electrodeposited by hard nickel salt solution with direct current density of 20  $\text{Adm}^{-2}$ . The solution was next stirred up using a magnet with 550 rpm, and the thickness of struts increased up to 50-80  $\mu\text{m}$ . Finally, the polymeric substrate was removed by pyrolysis. The coated specimen was then put into the tube furnace and heated in a controlled procedure in order to prevent any thermal shock to the foam. The argon gas with the purity of 99.999 % flowed continuously during heating and cooling in the tube furnace.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

Please cite this article as: Zafardoagoo, M., Sadrnezhad, S. Kh., "Synthesis of porous nickel foam based on electroless plating on polymeric substrate and electrodeposition", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 11, No. 1, (2022), 69-79. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.325426.1210>).



Followed by polyurethane removal, the XRD patterns demonstrated in Figure 1 indicated three primary reflections at  $2\theta$  of  $44.64^\circ$ ,  $51.92^\circ$ , and  $76.46^\circ$  designated to the (111), (200), and (220) planes of Face-Centered-Cubic (FCC) nickel, respectively, confirming

that Ni was the dominant constituent of the obtained foam. Meanwhile, other small peaks of Ni<sub>3</sub>P are observed in the XRD pattern due to the sodium hypophosphite reducing agent during the electroless plating.

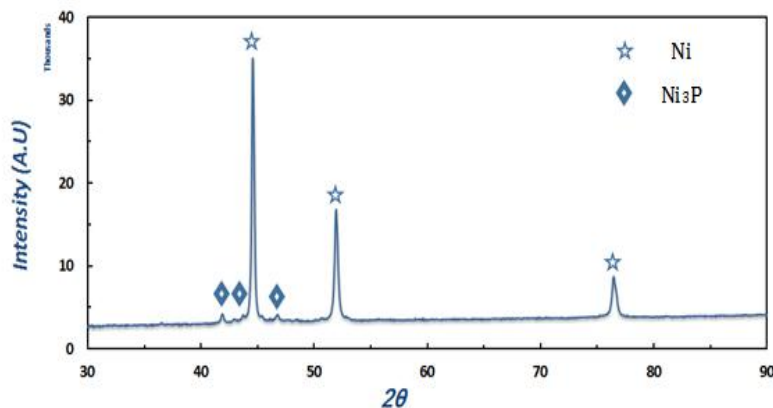


Figure 1. XRD for nickel foam after polyurethane removal

Pure nickel coatings have a truncated pyramidal structure [11] with a typical morphology with (111) preferred texture that is also shown in the SEM images.

Figure 2 shows the compressive stress-strain schematic curve of the metal foam [12]. As observed in the curves, three distinct regions can be distinguished: (1) the linear elastic deformation (straight linear relation between stress and strain), (2) collapse plateau (sudden decrease in stress after the first peak of stress and plateau area), and (3) densification region (slight increase in the

strain, rapid growth of stress, and more significant line slope). The compressive strength values (stress peak after the linear elastic phase) for electroless-coated and hard nickel-coated foams were measured as 0.07 and 1.1 Mpa, respectively, and the hardness value was measured as 147 Hv.

The specific surface area of the synthesized nickel foam was measured as  $1.48 \text{ m}^2\text{gr}^{-1}$  by  $\text{N}_2$  adsorption and desorption isotherms obtained at the liquid- $\text{N}_2$  temperature using a BET analyzer.

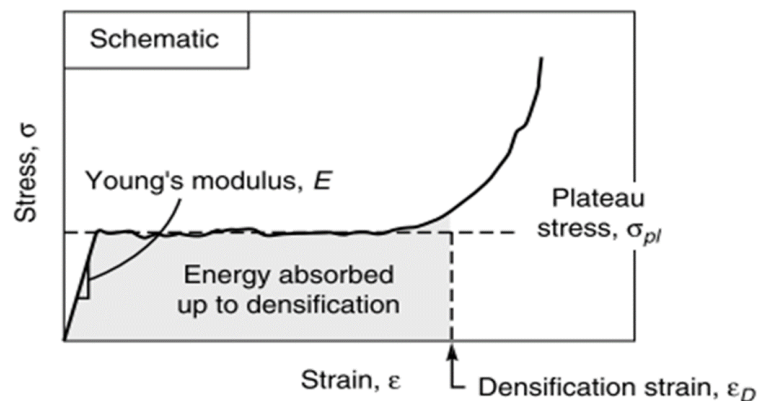


Figure 1. Schematic stress-strain curve of metal foams

#### 4. CONCLUSION

The thickness of the struts coated by electroless method in the range of 5-15 ( $\mu\text{m}$ ) increased by hard nickel electrodeposition to 50-90 ( $\mu\text{m}$ ), and an increased plateau height of stress-strain curve of foam was indicative of more compression strength of the porous structure. The specific surface area ( $S_{\text{BET}}$ ) of the synthesized nickel foam was obtained as  $1.48 \text{ m}^2\text{gr}^{-1}$  that gains significance when using nickel foam as catalyst support and batteries electrode.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to acknowledge Sharif University of Technology for providing research facilities.

#### REFERENCES

1. Ashby, M. F., Gibson, L. J., "Cellular solids: Structure and properties", *Press Syndicate of the University of Cambridge*, Cambridge, UK, (1997), 175-231.
2. Nivala, P. T., James, S. P., "Metal open-cell foams with periodic topology fabricated by spark plasma sintering", *Materialia*, Vol. 8, (2019), 100428. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100428>
3. Sharma, V. M., Pal, S. K., Racherla, V., "A new sintering method for fabrication of open-cell metal foam parts", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 35, No. 15, (2020), 1717-1726. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1784933>
4. Hussain, A., Abidi, I. H., Tso, C. Y., Chan, K. C., Luo, Z., Chao, C. Y. H., "Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 124, (2018), 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.019>
5. Chaturvedi, S., Dave, P. N., Shah, N., "Applications of nanocatalyst in new era", *Journal of Saudi Chemical Society*, Vol. 16,

- 
- No. 3, (2012), 307-325. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2011.01.015>
6. Zeng, W. -W., Hou, S. -H., Ding, X. -J., Duan, D. -L., Li, S., Zhang, S. -H., "Synthesis and compression property of oxidation-resistant Ni–Al foams", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 30, No. 10, (2017), 965-972. <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0569-4>
  7. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6, (2001), 559-632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
  8. Zhao, C. Y., "Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 13, (2012), 3618-3632. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.017>
  9. Inazawa, S., Hosoe, A., Majima, M., Nitta, K., "Novel plating technology for metallic foam", *SEI Technical Review*, Vol. 71, (2010), 23-30. <http://global-sei.com/technology/tr/bn71/pdf/71-04.pdf>
  10. Lefebvre, L. P., Banhart, J., Dunand, D. C., "Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, No. 9, (2008), 775-787. <https://doi.org/10.1002/adem.200800241>
  11. Tanksale, A., Beltramini, J., Dumesic, J., Lu, G. Q., "Effect of Pt and Pd promoter on Ni supported catalysts—A TPR/TPO/TPD and microcalorimetry study", *Journal of Catalysis*, Vol. 258, No. 2, (2008), 366-377. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2008.06.024>
  12. Bleistein, T., Jung, A., Diebels, S., "A microsphere-based material model for open cell metal foams", *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Vol. 32, No. 1, (2020), 255-267. <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00799-7>



مقاله کامل پژوهشی

## سنتز فوم نیکل متخلخل به روش اندودکاری شیمیایی زیرآیند بسپاری و رسوبدهی الکتروشیمیایی

معصومه ظفر دعاگو<sup>۱</sup>، سیدخطیب‌الاسلام صدرنژاد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، پردیس بین‌الملل، جزیره کیش، هرمزگان، ایران

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، تهران، ایران

### تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

دریافت نسخه اصلاح‌شده: ۱۴۰۰/۱۱/۲۱

پذیرش علمی: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

### کلیدواژه‌ها:

نیکل متخلخل،

فوم سلول باز،

اندودکاری شیمیایی (الکترولس)،

الکتروشیمیایی،

تجزیه حرارتی

**چکیده** هدف از این پژوهش، سنتز فوم نیکل متخلخل با کاربری‌های نوین، توسط روشی اقتصادی بود. روش‌های ساخت فوم‌های فلزی، با توجه به ترکیب خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها اعم از چگالی کم، نفوذپذیری بالای سیالات و هدایت حرارتی بالا، در مقایسه با فوم‌های بسپاری و سرامیکی در کاربردهای نوین، جذابیت بیشتری در میان پژوهشگران یافته است. شکل سلول‌ها، اعم از باز یا بسته بودنشان، در خواص و کاربردهای فوم‌ها بسیار مؤثر است. امروزه، پژوهش‌های گسترده‌ای درباره کاربری فوم‌های فلزی در الکترودها، مبدل‌های حرارتی، فیلترهایی مانند فوم نیکل در الکترودها و باتری‌ها و کاتالیزورها در تولید هیدروژن به‌عنوان سوخت پاک انجام می‌شود. در این پژوهش، ابتدا، فرایند چندمرحله‌ای شیمیایی شامل چربی‌زدایی، حکاکی، حساس‌سازی، فعال‌سازی و اندودکاری شیمیایی (رسوبدهی الکترولس) نیکل روی زیرآیند (substrate) بسپار پلی‌پورتان نارسا انجام شد. سپس لایه ضخیم‌تری از نیکل با روش الکتروشیمیایی نشانده شد و در ادامه، زیرآیند پلی‌پورتان، در کوره تبوئی با جریان گاز آرگون خالص و برنامه عملیات حرارتی کنترل‌شده، با تجزیه حرارتی زدوده شد و فوم نیکل سنتز شد. آزمون‌های شناسایی شامل پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و اندازه‌گیری سطح ویژه (SBET)، روی فوم نیکل سنتز شده نهایی، انجام شد. طی آزمون فشار، استحکام فشاری فوم حاصل از اندودکاری شیمیایی ۰/۰۷ MPa و با ادامه پوشش‌دهی با روش الکتروشیمیایی، استحکام فشاری به ۱/۱ MPa افزایش یافت و سختی Hv ۱۴۵ اندازه‌گیری شد.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.325426.1210> URL: [https://www.jamt.ir/article\\_144797.html](https://www.jamt.ir/article_144797.html)

### ۱- مقدمه

تولید فوم، شامل الف) مذاب فلزی یا ریخته‌گری نظیر ریخته‌گری دقیق، ب) پودر جامد فلزی یا متالورژی پودر، ج) بخار فلزی یا اجزای گازی فلزی و د) محلول یونی فلزی (رسوب الکتروشیمیایی) دسته‌بندی می‌شوند [۳-۱]. برخی روش‌های تولید، مانند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای [۴] و تف‌جوشی انحلال<sup>۱</sup> (SDP) [۵] نوین‌ترند و برخی روش‌ها به مرحله تجاری رسیده‌اند و محصولاتشان در بازارهای بین‌المللی معامله می‌شوند [۲ و ۶].

در دو دهه اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای درباره روش‌های تولید دسته جدیدی از مواد پیشرفته متخلخل، فوم‌ها که عاملان به صورت متخلخل و با کاربردهای متنوع در صنایع مختلف دنیا تولید می‌شوند، انجام شده است. فوم‌ها از مواد بسپاری، سرامیکی و فلزی و با خواص متفاوت تولید می‌شوند. چهار روش اصلی تولید فوم‌های فلزی براساس حالت ماده در

<sup>۱</sup> Sintering and Dissolution Process

\*عهدہ دار مکاتبات: سیدخطیب‌الاسلام صدرنژاد

نشانی: ایران، تهران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد، تلفن: ۰۲۱-۶۶۱۶۵۲۱۵-۶۶۱۶۵۲۱۵، دورنگار: ۰۲۱-۶۶۰۵۷۱۷

پیام‌نگار: [sadmezh@sharif.edu](mailto:sadmezh@sharif.edu)

از سوی دیگر، به دلیل حجم بالای تولید گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن روزافزون کره زمین و پیامدها و تهدیدهای جدی تغییرات اقلیمی، پژوهشگران، برای دستیابی به منابع انرژی پاک جایگزین، پژوهش‌های گسترده‌ای در خصوص توسعه مواد نوین در ساخت سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و باتری خودروهای الکتریکی انجام داده‌اند. همچنین، فرایندهای تولید هیدروژن از گاز طبیعی، به‌منزله منبع تولید انرژی پاک، مورد توجه پژوهشگران و پالایشگاه‌ها قرار گرفته‌است [۲ و ۷]. در نتیجه، پژوهش‌های گسترده‌ای با هدف بهینه‌سازی این فرایندهای شیمیایی انجام می‌شود. برای مثال، سنتز کاتالیزورهای پایه فومی سرامیکی و فوم فلزی برای استفاده در این صنایع رو به افزایش است. همچنین، در باتری خودروهای الکتریکی، فرایند ساخت الکترودهای فوم نیکلی متخلخل، به‌جای الکترودهای متداول صفحه‌ای، به‌دلیل راندمان بالاتر آن‌ها در ذخیره انرژی، دائماً بهینه‌سازی می‌شود [۸]. فوم‌ها دارای تخلخل‌های سه‌بعدی بیشتر از ۷۵ تا ۹۵ درصد هستند و به دلیل داشتن درصد بالای حفره‌ها، چگالی کمی دارند و بسیار سبک‌اند و با توجه به کاربردهای متنوعشان، مطالعات گسترده‌ای درباره رفتار مکانیکی فوم‌ها و روش‌های افزایش استحکام مکانیکی آن‌ها انجام شده است [۹ و ۱۰]. فوم‌های فلزی دارای ترکیبی از ویژگی‌های گوناگون شامل وزن کم، خواص حرارتی و مکانیکی اند و در مقایسه با فوم‌های بسپاری و سرامیکی، مزایا و معایبی دارند. مزیت اصلی فوم‌های فلزی بر فوم‌های بسپاری، استحکام بالاتر، تحمل دمای بیشتر و مقاومت در برابر برخی محیط‌های خوردنده است. از طرفی، قابلیت تغییر شکل پلاستیک فوم‌های فلزی، مقاومت به شوک حرارتی و هدایت حرارتی بالا مزیت اصلی آن‌ها بر فوم‌های سرامیکی است. قابلیت انتقال حرارت و الکتریسیته نیز خاصیت ویژه فوم‌های فلزی است. پژوهشگران همچنین علاقه بسیاری به تحقیق درباره تولید انواع فوم‌های جامد فلزی (مانند آلومینیم، مس، نیکل و آلیاژهای مربوطه) و خواصشان مانند خواص مکانیکی، فیزیکی، حرارتی، الکتریکی، صوتی و نفوذپذیری سیالات یافته‌اند. خواص فوم‌های فلزی به خواص فلز پایه، چگالی نسبی و هم‌بندی<sup>۱</sup> حفره‌ها (باز یا بسته بودن حفره‌ها و اندازه حفره‌ها) بستگی دارد. انتخاب و

کاربرد فوم‌های فلزی به ویژگی‌های ذاتی اجزای سازنده آن‌ها وابسته است [۱۴-۱۱]. عیب مهم فوم‌های فلزی، قیمت بالای تولید و مقرون به‌صرفه نبودن آن‌هاست، اما این مشکل با استفاده از روش‌های جدید و مقرون به‌صرفه‌تر تولید مانند روش الکتروشیمیایی تولید فوم‌های فلزی با توجه به نیاز صنایع برطرف می‌شود [۸ و ۱۵]. روش تولید تأثیر فراوانی در خواص فوم حاصله مانند سطح ویژه دارد. برای مثال، سطح ویژه فوم نیکل محصولات دو شرکت اینکوفوم، با فرایند رسوب‌دهی شیمیایی اجزای گازی<sup>۲</sup> (CVD) مقدار  $292 \text{ cm}^2\text{gr}^{-1}$  و شرکت میتسویشی، با فرایند فومینگ دوغابی  $19/7 \text{ cm}^2\text{gr}^{-1}$ ، با اندازه حفره‌های یکسان معادل  $600$  میکرومتر و تخلخل ۹۵ درصد (اندازه‌گیری شده به روش برنر، امیت و تالر<sup>۳</sup> (BET)) گزارش شده است [۱۶]. فوم‌های فلزی، با توجه به خصوصیات منحصر به فرد خود در بسیاری از صنایع و تجهیزات اعم از الکتروود باتری‌ها، پایه‌های کاتالیست، فیلترها و مبدل‌های حرارتی و تجهیزات زیست‌مواد، عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند [۱۵]. امروزه، پژوهش‌های بسیاری در خصوص مواد فلزی متخلخل و خواص کاتالیزوری آن‌ها از نظر واکنش‌های گوناگون شیمیایی هیدروکربن‌ها در فرایندهای مختلف پتروشیمی در کشورهای پیشرفته صنعتی انجام می‌شود [۱۷ و ۱۸]. از فناوری‌های تولید هیدروژن می‌توان به روش تبدیل<sup>۴</sup> متان اشاره کرد که در این روش، گاز متان تحت واکنش‌های شیمیایی بخار آب یا گاز دی‌اکسید کربن یا ترکیبی از هر دو قرار می‌گیرد و هیدروژن تولید می‌کند [۱۷ و ۱۹]. از مهم‌ترین کاتالیزورهای مصرفی در فرایندهای تبدیل متان، کاتالیزور نیکل است. پژوهش‌های اخیر با رویکردهایی متفاوت اعم از سنتز کاتالیزورهای نوین مانند استفاده از مواد سرامیکی یا فلزی فوم نیکل و حتی بهینه‌سازی جداسازی نیکل برای استفاده از کاتالیزورهای مستعمل انجام شده است [۲۰ و ۲۱]. با توجه به کاربرد و خواص مورد نیاز، فرایندهای تکمیلی گوناگونی روی فوم نیکل شامل عملیات حرارتی، آلیاژسازی با عناصری مانند کروم، آهن، آلومینیم، تیتانیم و قلع انجام می‌شود [۲۴-۲۲]. در

<sup>3</sup> Brunauer, Emmett and Teller

<sup>4</sup> Reforming

<sup>1</sup> Topology

<sup>2</sup> Chemical Vapour Deposition

سلول باز بسپاری، به وسیله رسوب‌دهی اندودکاری شیمیایی، لایه نازک نیکل به ضخامت ۲ تا ۵ میکرومتر نشانده شد.

جدول ۱. مرحله چربی‌زدایی زیرآیند بسپاری

اجزا	غلظت (g.L <sup>-1</sup> )	دما (°C)	زمان (min)	pH
هیدروکسید سدیم	۳۵	۷۰	۳	۱۲
کربنات سدیم	۲۵			
فسفات سدیم	۱۰			

جدول ۲. مرحله حکاکی کردن زیرآیند بسپاری

اجزا	غلظت (g.L <sup>-1</sup> )	دما (°C)	زمان (min)	pH
پرمنگنات پتاسیم	۱	۴۵	۲	۳
اسید سولفوریک	۰/۵			

جدول ۳. مرحله حساس‌سازی زیرآیند بسپاری

اجزا	غلظت (g.L <sup>-1</sup> )	دما (°C)	زمان (min)	pH
کلرید قلع	۲۰	۳۰	۵	۳
اسید کلریدریک	۴۰			

جدول ۴. مرحله فعال‌سازی زیرآیند بسپاری

اجزا	غلظت (g.L <sup>-1</sup> )	دما (°C)	زمان (min)	pH
کلرید پالادیم	۰/۵	۵	۴۰	۴
اسید کلریدریک	۱			

جدول ۵. مرحله اندودکاری شیمیایی نیکل روی زیرآیند بسپاری

اجزا	غلظت (g.L <sup>-1</sup> )	دما (°C)	زمان (min)	pH
سولفات نیکل	۲۰	۳۰	۸۰	۴
اسید لاکتیک	۳۵			
هیپوفسفات سدیم	۲۵			
استات سدیم	۲۵			

در ادامه، بر روی لایه نازک نیکل فوم حاصل از اندودکاری شیمیایی، با استفاده از حمام نیکل سخت<sup>۵</sup>، لایه ضخیم‌تری از نیکل، نشانده شد. رسوب‌دهی نیکل، با استفاده از

این پژوهش، فوم سلول باز نیکل با مشخصه ۴۰ حفره در اینچ<sup>۱</sup> (ppi) طی فرایند چندمرحله‌ای شیمیایی، به روش اندودکاری شیمیایی<sup>۲</sup> (الکترولس) و سپس با افزایش ضخامت نیکل توسط رسوب‌دهی الکتروشیمیایی سنتز شد.

## ۲- روش تحقیق

برای سنتز فوم نیکل، ابتدا فوم اسفنجی شکل پلی‌یورتان با حفره‌هایی به اندازه ۴۰ اینچ (ppi) خرید و برش داده شد. همه مواد شیمیایی از برند Merck بودند. مراحل سنتز فوم نیکل طی فرایندی چندمرحله‌ای انجام شد. در کلیه حمام‌ها از همزن سرمایی مغناطیسی برای یکنواخت‌سازی محیط استفاده شد و بعد از هر مرحله، نمونه کاملاً توسط آب مقطر شست‌وشو داده شد تا هیچ‌گونه آلودگی از حمام‌های قبلی وارد حمام بعدی نشود. ابتدا، براساس جدول ۱، زیرآیند<sup>۳</sup> بسپاری چربی‌گیری قلیایی شد تا تمامی ناخالصی‌ها و گردوغبار آن زدوده شود. سپس، با کمک محلولی با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۲، عملیات حکاکی<sup>۴</sup> روی نمونه انجام شد. فرایند حساس‌سازی نمونه با استفاده از غوطه‌ور کردن نمونه در حمام حاوی محلول ارائه شده در جدول ۳ انجام شد. این مرحله، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین مرحله برای کمک به مرحله فعال‌سازی است؛ زیرا، اگر برخی زیرآیندها در شارژ سطحی یا لایه شکل‌گرفته توسط حساس‌سازی تغییر نیابند، نمی‌توان آن‌ها را آبکاری کرد. حمام فعال‌سازی، گران‌ترین حمام در این فرایند است و هدف از انجام مرحله فعال‌سازی، پدید آوردن نقاط فعال روی سطح زیرآیند است، زیرا اولین ذرات رسوب شیمیایی در این محل‌ها می‌نشینند. ترکیب شیمیایی این حمام طبق جدول ۴ است. نمونه مجدداً با آب مقطر کاملاً شسته و طبق جدول ۵، وارد حمام اندودکاری شیمیایی نیکل شد و رسوب نقره‌ای‌رنگ و یکنواخت نیکل به روش اندودکاری شیمیایی روی تمام سطح فوم پلی‌یورتان آماده‌شده نشست. فسفات سدیم موجود در این حمام، الکترون لازم برای انجام واکنش شیمیایی را تأمین می‌کند. سپس، نمونه شسته و با خشک‌کن خشک شد و روی نمونه فوم

<sup>4</sup> Etching

<sup>5</sup> Hard Nickel

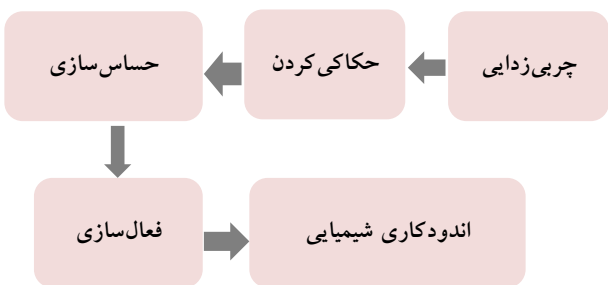
<sup>1</sup> Pore Per Inch

<sup>2</sup> Electroless Plating

<sup>3</sup> Substrate

محل‌هایی از سلول‌ها نیز پلی‌یورتان باقی‌مانده سیاه‌رنگ مشاهده شد (طبق شکل ۳).

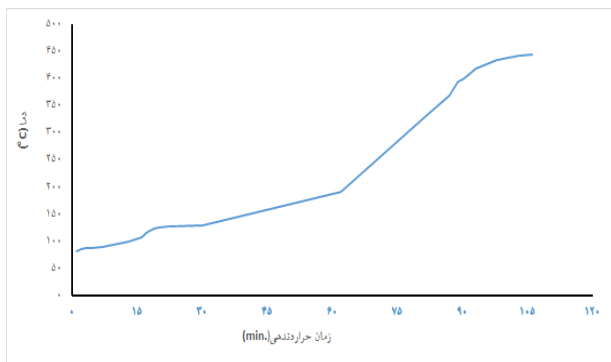
مرحله ۱:



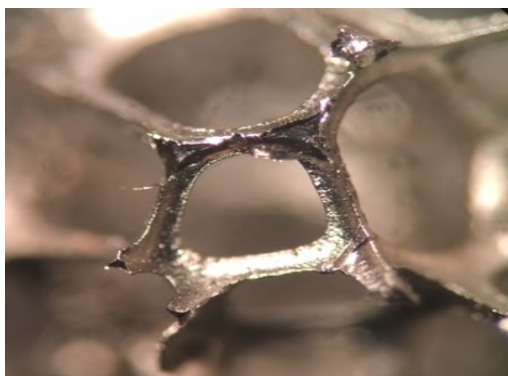
مرحله ۲:



شکل ۱. مراحل تصویری ۱ و ۲ (که فرایند سنتز فوم نیکل سلول باز به روش رسوب‌دهی را نشان می‌دهند)



شکل ۲. نمودار عملیات حرارتی برای حذف پلی‌یورتان



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری تجزیه حرارتی ناقص (این تصویر پلی‌یورتان باقی‌مانده و حفره‌های حاصل از حذف را نشان می‌دهد)

حمام و ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۶، در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و به مدت یک ساعت با pH برابر با ۵ انجام شد و لایه‌ای از نیکل با سختی بیشتر از سایر حمام‌های حاوی یون نیکل اعم از حمام وات<sup>۱</sup> یا سولفامات<sup>۲</sup> روی فوم قبلی نشانده شد.

جدول ۶. مرحله رسوب الکتروشیمیایی نیکل

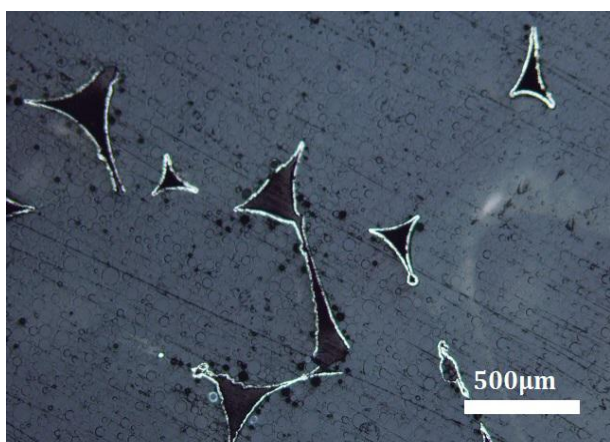
غلظت (g.L <sup>-1</sup> )	اجزاء
۱۸۰	سولفات نیکل
۲۵	کلرید آمونیوم
۳۰	اسید بوریک

برای عملیات رسوب‌دهی، آند و کاتد توسط سیم تیتانیومی در حمام قرار گرفتند. نیکل‌های آندی دوبه‌دو در کاغذ صافی قرار گرفتند و در حمام قرار داده شدند. نمونه به منبع تغذیه متصل شد و در دمای محیط با همزن مغناطیسی به مدت ۶۰ دقیقه و با اعمال جریان مشخص پوشش‌دهی شد. پس از خروج نمونه از حمام، توسط آب مقطر کاملاً آب‌کشی شد. ضمناً در رسوب‌دهی الکتروشیمیایی، برای افزایش زبری پوشش که در آماده‌سازی برای کاربرد در ساخت کاتالیزور اهمیت فراوانی دارد، از جریان مستقیم استفاده شد. مرحله بعدی، فرایند حذف زیرآیند پلی‌یورتان در کوره بود. به دلیل حساسیت مرحله زدودن فوم بسیاری، نمونه در کوره تیوبی با جریان آرام گاز آرگون و خلوص بالای ۹۹/۹۹۹ درصد قرار گرفت. طرح‌واره مراحل سنتز در شکل ۱ ارائه شده است. در مرحله حذف زیرآیند بسیاری، ابتدا کوره با نرخ گرمایش ۲ درجه سلسیوس بر دقیقه تا دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس گرم شد و به مدت ۳۰ دقیقه در این دما نگهداری شد تا شوک حرارتی به نمونه وارد نشود. سپس کوره تا دمای ۴۲۰ درجه سلسیوس حرارت‌دهی و به مدت مشخص در این دما نگهداری شد. در آخر، نمونه در کوره با جریان آرام گاز آرگون سرد شد (طبق شکل ۲). گفتنی است، در مواردی که ناخالصی در گاز آرگون وجود داشت یا در هر موردی که به تجزیه حرارتی ناقص منجر شد، ضمن ایجاد حفره‌هایی در فوم نقره‌ای‌رنگ نیکل که نشان‌دهنده زدایش بسیار است، در

<sup>2</sup> Sulphamate

<sup>1</sup> Watt

در حمام اندودکاری شیمیایی هستند. عامل احیاکننده فسفیت می‌توانست به ایجاد لایه  $\text{Ni}_3\text{P}$  منجر شود نه لایه خالص نیکل. با وجود این، با کنترل عوامل ساخت حمام‌های پوشش‌دهی یعنی کاهش مقدار ماده احیاکننده و افزایش pH، می‌توان مقدار تشکیل لایه  $\text{Ni}_3\text{P}$  را به‌حداقل رساند. پوشش اندودکاری شیمیایی نیکل فسفر پایین (۵-۱ درصد) میکروبلورین، پوشش حاوی فسفر متوسط (۱۰-۶ درصد) ساختار ترکیبی بلورین-آمورف و پوشش فسفر بالا (۱۳-۱۱ درصد) دارای مقاومت به خوردگی بسیار بیشتر، اما سختی و مقاومت به سایش کمتری از پوشش‌های حاوی فسفر پایین‌تر بودند [۲۵].



(الف)



(ب)

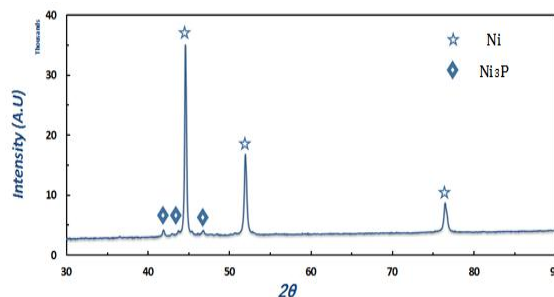
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع حکاکی شده نمونه فوم نیکل در مقیاس الف) پوشش اندودکاری شیمیایی ۵۰۰ میکرومتر و ب) پوشش الکتروشیمیایی ۵۰۰ میکرومتر

پس از حذف زیرآیند بسپاری، استحکام فشاری توسط دستگاه مدل HOUNSFIELD(H10KS) روی نمونه‌هایی با ابعاد  $1 \text{ mm}^2 \times 18/1 \times 17/6$  در دمای محیط اندازه‌گیری شد. ضمناً لودسل<sup>۱</sup> با ظرفیت ۵۰ کیلوگرم با درصد خطای صفر درصد روی دستگاه نصب شده بود.

پراش پرتو ایکس<sup>۲</sup> (XRD) توسط دستگاه PANalytical با آند مس و  $\text{K}\alpha$  ( $\lambda=0.15406 \text{ nm}$ , 40 kV, 40 mA) برای شناسایی فازهای بلوری نمونه فوم نیکل سنتز شده انجام شد. برای اندازه‌گیری سطح ویژه فوم نیکل نهایی، از دستگاه نانوسورد<sup>۳</sup> استفاده شد. نمونه در سلول شیشه‌ای دستگاه اندازه‌گیری ریخته و سطح ویژه با استفاده از معادلات برنر، امیت و تلر محاسبه شد.

### ۳- نتایج و بحث

طیف XRD فوم نیکلی حاصله در شکل ۴ ارائه شده است که حاکی از حضور بیشتر فاز نیکل خالص و مقدار کمی فسفید نیکل بود. قله‌های الگوهای پراش در محدوده  $2\theta < 80 < 20$  با نرم‌افزار Expert High Score شناسایی شدند.



شکل ۴. الگوی XRD فوم نیکل سنتز شده

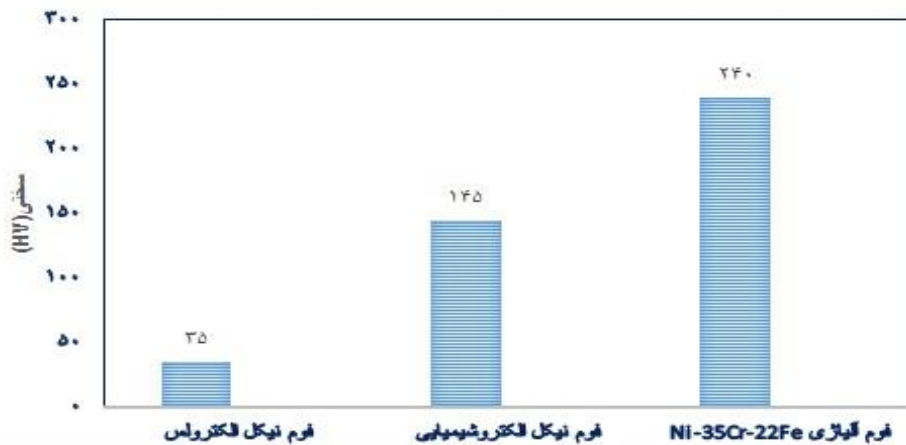
قله‌های اصلی مشاهده شده در زوایای  $2\theta$  الگوی XRD فوم نیکل سنتز شده بعد از حذف زیرآیند پلی‌یورتان (شکل ۴)، عبارت‌اند از  $44.7^\circ$ ،  $51.5^\circ$  و  $77.5^\circ$  که مربوط به صفحات بلوری به ترتیب (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) شبکه‌های بلوری مکعب با سطح مرکزدار<sup>۴</sup> (FCC) نیکل است و اثبات می‌کند که ماده اصلی تشکیل‌دهنده فوم سنتز شده نیکل است. قله‌های کوچک‌تر مربوط به  $\text{Ni}_3\text{P}$  و مربوط به هیپوفسفیتم سدیم، عامل احیاکننده

<sup>3</sup> NanoSORD<sup>4</sup> Face Centered Cubic<sup>1</sup> Load Cell<sup>2</sup> X-Ray Diffraction



نیکل حدود ۵ تا ۱۰ میکرومتر و ضخامت پوشش نیکل توسط رسوب‌دهی الکتروشیمیایی نیکل حدود ۶۰ تا ۹۰ میکرومتر افزایش یافت (شکل ۵). در شکل ۶، سختی نمونه‌های فوم نیکلی بعد از اندودکاری شیمیایی و بعد از رسوب الکتروشیمیایی برای فوم نیکل آلیاژی Ni-35Cr-22Fe [۲۶] نشان داده شده است.

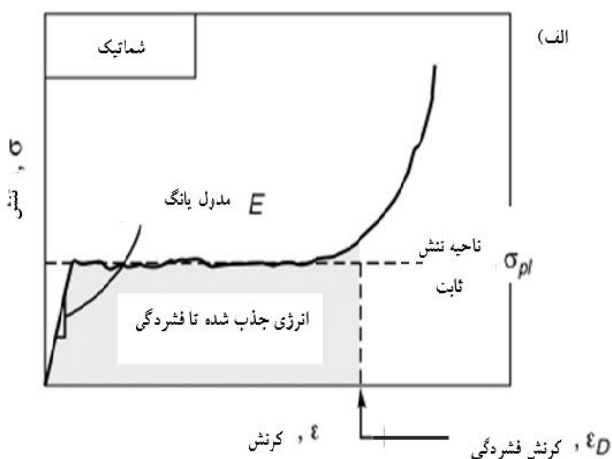
برای اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌ها، نمونه فوم در رزین سرد قرار داده شد. پس از سنباده‌زنی سطح، داخل مخلوطی از اسید فلوریدریک و اسید نیتریک به مدت ۳ ثانیه قرار داده و سپس کاملاً با آب مقطر شست‌وشو و خشک شد. ضخامت پوشش نیکل نمونه‌های فومی توسط میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شد و ضخامت پوشش حاصل از حمام اندودکاری شیمیایی



شکل ۶. نمودار ستونی سختی نمونه‌های فوم نیکل

قسمت، فشردگی و حتی شکستگی ردیف به‌ردیف سلول‌ها رخ می‌دهد [۲۸-۳۰]. در نهایت، استحکام فشاری نمونه اندودکاری شیمیایی،  $0.7 \text{ MPa}$  و استحکام فشاری نمونه فوم حاصل از الکتروشیمیایی  $1 \text{ MPa}$  به دست آمد.

گفتنی است، فوم‌های اندودکاری شیمیایی که برای حذف زیرآبند بسیار پلی‌یورتان، در کوره تیوبی با جریان گاز آرگون با خلوص ۶۵ و ۹۵ درصد حرارت داده شد، به نمونه فوم‌های اکسیدشده با پوسته‌ای نازک تبدیل شد و استحکام فشاری آن به حدی کم بود که قابل اندازه‌گیری نبود.



پس از حذف پایه بسیار پلی‌یورتان، استحکام فشاری در دمای محیط اندازه‌گیری شد. به دلیل پایین بودن استحکام فومی که فقط اندودکاری شیمیایی شده، از نمایش منحنی تنش - کرنش آن صرف‌نظر شد. مقایسه منحنی تنش - کرنش سایر پژوهش‌های انجام‌شده (طرح‌واره شکل ۷ الف) نشان داد که رفتار تغییر شکل بر اثر نیروی فشاری در فوم نیکل سنتز شده در این کار از شکل ۷ ب تبعیت می‌کند و شامل یک ناحیه تغییر شکل الاستیک خطی کوچک که بیانگر تغییر فرم الاستیک در دیواره‌های سلول‌های فوم بوده و سپس یک ناحیه نسبتاً بزرگ که با افزایش کرنش، تنش تقریباً ثابت است و تغییر فرم پلاستیک دیواره سلول‌ها، اتفاق می‌افتد. در این منحنی، افزایش کند کرنش و افزایش ناگهانی تنش با شیبی تند مربوط به ناحیه فشردگی فوم نیکل سنتز شده است و نوسان زیادی دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده پایداری خوب فوم نیکل در برابر نیروی فشاری است [۲۷]. البته در مواردی نوسان‌هایی در این ناحیه دیده می‌شود که به دلیل وجود نقص‌های ساختاری سلول‌ها اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، تسلیم و حتی شکست در برخی نواحی و سلول‌های ضعیف رخ می‌دهد. در ادامه، در منحنی تنش - کرنش، با افزایش کرنش، تنش نیز افزایش می‌یابد. در این

درواقع، یکی از اهداف مهم پژوهشگران در ساخت کاتالیزورهای ناهمگن، افزایش سطح ویژه است، زیرا این مشخصه در قابلیت جذب در واکنش‌های کاتالیزوری بسیار تأثیرگذار است [۳۳]. در مواد متخلخل سلول باز، سطح بیرونی فوم به مراتب کمتر از سطوح داخلی درهم پیچیده آن است و سطح خارجی فوم‌ها قابل چشم‌پوشی است [۳۴]. برای اندازه‌گیری سطح ویژه فوم نیکل روش BET مؤثر است و در فرایندهای کاتالیزوری، مولکول‌های گازی به راحتی داخل ریزحفره‌های فوم نیکل شده و در واکنش جامد-گاز، با افزایش قابلیت جذب، سرعت واکنش را افزایش می‌دهند. عدد  $S_{BET}$  برای نمونه فوم نیکل خالص سنتز شده،  $1/48 \text{ m}^2\text{gr}^{-1}$  به دست آمد و در کاتالیزور فومی Ru/Ce/Ni، سطح ویژه به مقدار  $1/8 \text{ m}^2\text{gr}^{-1}$  گزارش شده است [۳۵].

#### ۴- نتیجه‌گیری

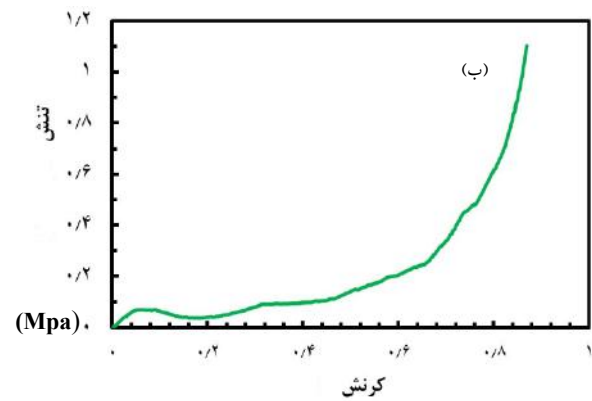
در این پژوهش، زیرآیند پلی‌یورتان با اندازه حفره‌های ۴۰ اینچی (ppi) طی فرایند چندمرحله‌ای شیمیایی و توسط روش اندودکاری شیمیایی به فوم نیکل تبدیل شد. سپس ضخامت پوشش توسط رسوب‌دهی الکتروشیمیایی تا حداکثر ۹۰ میکرومتر افزایش یافت و در نتیجه استحکام فوم نیکل سلول باز از  $0/07 \text{ Mpa}$  به  $1/1 \text{ Mpa}$  و سختی آن از  $35 \text{ Hv}$  به  $145 \text{ Hv}$  افزایش یافت. مرحله زدودن زیرآیند بسیاری اهمیت بسیاری دارد و اگر این فرایند کنترل نشود، محصول نهایی اکسید می‌شود و استحکام مکانیکی نخواهد داشت. فوم نیکل چگالی کمی دارد و استحکام آن در کاربرد نهایی آن بسیار تأثیرگذار خواهد بود.  $S_{BET}$  فوم نیکل خالص سنتز شده،  $1/48 \text{ m}^2\text{gr}^{-1}$  به دست آمد که برای کاربرد در الکتروود باتری و کاتالیست می‌تواند امیدبخش باشد [۳۱].

#### ۵- سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های دانشگاه صنعتی شریف، در انجام و پیشبرد این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

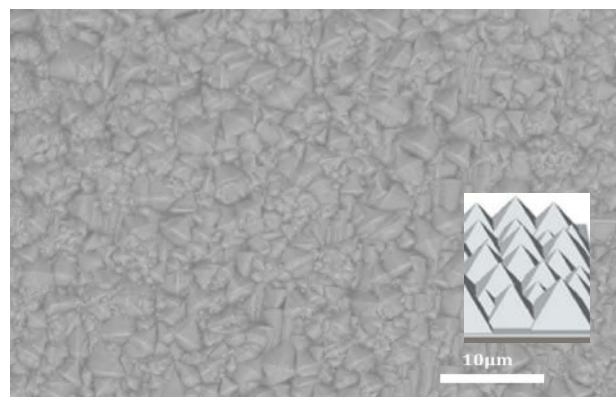
#### مراجع

1. Ashby, M. F., Gibson, L. J., "Cellular solids: Structure and properties", *Press Syndicate of the University of Cambridge*, Cambridge, UK, (1997), 175-231.



شکل ۷. الف) منحنی طرح‌واره تنش - کرنش فوم‌های فلزی [۳۱] و ب) منحنی تنش - کرنش فوم نیکلی رسوب‌دهی شده به روش الکتروشیمیایی

از بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی سلول‌های فوم نیکلی سنتز شده در شکل ۸، ساختار هرمی بریده شده ناقصی که ریخت‌شناسی مخصوص رسوب‌های نیکل خالص با بافت ترجیحی (۱۱۱) است، مشاهده می‌شود [۳۲]. در ادامه، پس از بررسی‌های متعدد، به منظور بهبود استحکام، با افزایش خلوص گاز آرگون به ۹۹/۹۹۹ درصد، نمونه سالم و با استحکام بالاتری به دست آمد و ضخامت پوشش با روش الکتروشیمیایی افزایش داده شد. با توجه به این‌که نفوذپذیری فوم سلول باز در کاربرد آن بسیار مهم است، افزایش ضخامت تا ۹۰ میکرومتر انجام شد، در حالی که اندازه هر سلول فوم سنتز شده حدود ۶۰۰ میکرومتر بود. در فوم‌ها، به دلیل ساختار متخلخل و وجود حفره‌ها، اندازه سطح ویژه به شدت افزایش می‌یابد و همین خاصیت در برخی کاربردها، نظیر ساخت کاتالیزورهای نوین، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است.



شکل ۸. تصویر SEM ساختار بلوری رسوب الکتروشیمیایی نیکل در مقیاس ۱۰ میکرومتر

19. Pegios, N., Schroer, G., Rahimi, K., Palkovits, R., Simeonov, K., "Design of modular Ni-foam based catalysts for dry reforming of methane", *Catalysis Science & Technology*, Vol. 6, No. 16, (2016), 6372-6380. <http://dx.doi.org/10.1039/C6CY00282J>
20. Ertl, G., Knözinger, H., Weitkamp, J., *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, VCH Weinheim, (1997).
21. Salari, H., "Optimization study of nickel leaching from used catalysts and investigation of nickel separation by precipitation", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 9, No. 4, (2021), 69-75. <https://dx.doi.org/10.30501/jamt.2020.232659.1093>
22. Pang, Q., Wu, G. H., Xiu, Z. Y., Chen, G. Q., Sun, D. L., "Synthesis and mechanical properties of open-cell Ni-Fe-Cr foams", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 534, (2012), 699-706. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.034>
23. Steinhauer, B., Kasireddy, M. R., Radnik, J., Martin, A., "Development of Ni-Pd bimetallic catalysts for the utilization of carbon dioxide and methane by dry reforming", *Applied Catalysis A: General*, Vol. 366, No. 2, (2009), 333-341. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.07.021>
24. Vinay, B., Rao, K. S., "Development of aluminum foams by different methods and evaluation of its density by Archimedes principle", *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, Vol. 2, No. 4, (2012), 148-152. <https://doi.org/10.9756/BIJEMS.1866>
25. Elansezhian, R., Ramamoorthy, B., Kesavan Nair, P., "Effect of surfactants on the mechanical properties of electroless (Ni-P) coating", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 203, No. 5-7, (2008), 709-712. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.08.021>
26. Qiu, P., Wu, G. -H., Sun, D. -L., Xiu, Z. -Y., Zhang, Q., Hu, Z. -L., "Compressive property and energy absorption characteristic of 3D open-cell Ni-Cr-Fe alloy foams under quasi-static conditions", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 2, (2012), s566-s572. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61762-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61762-2)
27. Lajevardi, S. A., Shahrabi, T., Szpunar, J. A., "Synthesis of functionally graded nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ni composite coating by pulse electrodeposition", *Applied Surface Science*, Vol. 279, (2013), 180-188, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.04.067>
28. Chen, J., "Mechanical properties of electrolyte jet electrodeposited nickel foam", *Journal of Engineering Science and Technology Review*, Vol. 6, No. 2, (2013), 53-56. <http://jestr.org/downloads/Volume6Issue2/fulltext126213.pdf>
29. Yu, H., Guo, Z., Li, B., Yao, G., Luo, H., Liu, Y., "Research into the effect of cell diameter of aluminum foam on its compressive and energy absorption properties", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 454, (2007), 542-546. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.091>
30. Duarte, I., Fiedler, T., Krstulović-Opara, L., Vesenjajk, M., "Brief review on experimental and computational techniques for characterization of cellular metals", *Metals*, Vol. 10, No. 6, (2020), 726. <https://doi.org/10.3390/met10060726>
31. Bleistein, T., Jung, A., Diebels, S., "A microsphere-based material model for open cell metal foams", *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Vol. 32, No. 1, (2020), 255-267. <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00799-7>
32. Tanksale, A., Beltramini, J., Dumesic, J., Lu, G. Q., "Effect of Pt and Pd promoter on Ni supported catalysts—A TPR/TPO/TPD and microcalorimetry study", *Journal of Catalysis*, Vol. 258, No. 2, (2008), 366-377. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2008.06.024>
33. Abdollahifar, M., Haghghi, M., Babaluo, A. A., Talkhoncheh, S. K., "Sono-synthesis and characterization of bimetallic Ni-Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO nanocatalyst: Effects of metal content on catalytic properties and activity for hydrogen production via CO<sub>2</sub> reforming of CH<sub>4</sub>", *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 31, (2016), 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.12.010>
34. Liu, P., Chen, G., *Porous Materials: Processing and Applications*, Oxford Elsevier Science & Technology, Butterworth-Heinemann, (2014).
35. Cimino, S., Cepollaro, E. M., Lisi, L., Fasolin, S., Musiani, M., Vázquez-Gómez, L., "Ru/Ce/Ni metal foams as structured catalysts for the methanation of CO<sub>2</sub>", *Catalysts*, Vol. 11, No. 1, (2021), 13. <https://doi.org/10.3390/catal11010013>
2. Pang, Q., Wu, G. H., Xiu, Z. Y., Jiang, L. T., Sun, D. L., "Microstructure, oxidation resistance and high-temperature strength of a new class of 3D open-cell nickel-based foams", *Materials Characterization*, Vol. 70, (2012), 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.010>
3. Wan, T., Liu, Y., Zhou, C., Chen, X., Li, Y., "Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review", *Journal of Materials Science & Technology*, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.039>
4. Nivala, P. T., James, S. P., "Metal open-cell foams with periodic topology fabricated by spark plasma sintering", *Materialia*, Vol. 8, (2019), 100428. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100428>
5. Sharma, V. M., Pal, S. K., Racherla, V., "A new sintering method for fabrication of open-cell metal foam parts", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 35, No. 15, (2020), 1717-1726. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1784933>
6. Mellouli, S., Dhaou, H., Askri, F., Jemni, A., Ben Nasrallah, S., "Hydrogen storage in metal hydride tanks equipped with metal foam heat exchanger", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 23, (2009), 9393-9401. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.043>
7. Hussain, A., Abidi, I. H., Tso, C. Y., Chan, K. C., Luo, Z., Chao, C. Y. H., "Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 124, (2018), 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.019>
8. Chaturvedi, S., Dave, P. N., Shah, N., "Applications of nanocatalyst in new era", *Journal of Saudi Chemical Society*, Vol. 16, No. 3, (2012), 307-325. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2011.01.015>
9. Zeng, W. -W., Hou, S. -H., Ding, X. -J., Duan, D. -L., Li, S., Zhang, S. -H., "Synthesis and compression property of oxidation-resistant Ni-Al foams", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 30, No. 10, (2017), 965-972. <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0569-4>
10. Fly, A., Meyer, Q., Whiteley, M., Iacoviello, F., Neville, T., Shearing, P., Brett, D. J. L., Kim, C., Chen, R., "X-ray tomography and modelling study on the mechanical behaviour and performance of metal foam flow-fields for polymer electrolyte fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 14, (2019), 7583-7595. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.206>
11. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6, (2001), 559-632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
12. Zhao, C. Y., "Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 13, (2012), 3618-3632. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.017>
13. Inazawa, S., Hosoe, A., Majima, M., Nitta, K., "Novel plating technology for metallic foam", *SEI Technical Review*, Vol. 71, (2010), 23-30. <http://global-sei.com/technology/tr/bn71/pdf/71-04.pdf>
14. Tajik Jamal-Abad, M., "Experimental investigation on the effect of partially metal foam inside the absorber of parabolic trough solar collector", *International Journal of Engineering*, Vol. 30, No. 2, (2017), 281-287. <https://iranjournals.nlai.ir/handle/123456789/336022>
15. Lefebvre, L. P., Banhart, J., Dunand, D. C., "Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, No. 9, (2008), 775-787. <https://doi.org/10.1002/adem.200800241>
16. Diao, K. K., Xiao, Z., Zhao, Y. Y., "Specific surface areas of porous Cu manufactured by lost carbonate sintering: Measurements by quantitative stereology and cyclic voltammetry", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 162, (2015), 571-579. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.031>
17. Li, D., Nakagawa, Y., Tomishige, K., "Methane reforming to synthesis gas over Ni catalysts modified with noble metals", *Applied Catalysis A: General*, Vol. 408, No. 1, (2011), 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.09.018>
18. Rosen, B. A., Gileadi, E., Eliaz, N., "Electrodeposited Re-promoted Ni foams as a catalyst for the dry reforming of methane", *Catalysis Communications*, Vol. 76, (2016), 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2015.12.014>