



Semnan University



Research Article

Surface properties and corrosion of 304SS steel surfaces prepared by magnetoelectropolishing method

Sahar Kiani^a, Hamidreza Moazzami^b, Maryam Khajenoori^{a,*}

^aDepartment of Chemistry, School of Chemical Gas and Petroleum Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

^bNuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 14/Dec/2023

Revised: 28/Feb/2024

Accepted: 03/Mar/2024

Keywords:

Electropolish,
Magnetoelectropolish,
Magnetic field, Anti-
corrosion properties.

ABSTRACT

In this research, the magnetoelectropolishing method was used to prepare the surface of 304 SS steel. The electropolishing process has been carried out in different modes including no magnetic field, Lorentzian force perpendicular to the surface outward, Lorentzian force parallel to the surface and Lorentzian force perpendicular to the surface inward. Scanning electron microscopy, atomic force microscopy, potentiodynamic polarization test and electrochemical impedance were used to check the surface morphology, elemental composition, surface roughness and corrosion resistance of the samples in each state. Based on the results, the direction of the magnetic field and in fact the direction of the hydrodynamic flow resulting from the Lorentzian force has a decisive contribution to the surface properties of the sample such as morphology, roughness and corrosion resistance. The best results occurred when the Lorentzian force was parallel to the surface. In this case, the amount of iron on the surface reaches 69.94%, which is the lowest amount compared to other situations where the magnetic field is placed, and the amount of iron in the case where the magnetic field is not entered is 73.53%, which shows an improvement in corrosion resistance. In addition, the results of potentiodynamic polarization also confirm that the highest harvesting rate is when the Lorentzian force is parallel to the surface. Based on the results, the magnetoelectropolishing method is suggested as an efficient method to improve the surface properties and corrosion resistance of stainless steel.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2024.32670.2237>

© 2024 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

* Corresponding author: Assistant Professor of Chemical Engineering. E-mail address: m_khajenoori@semnan.ac.ir

How to cite this article: Kiani, S., Moazzami, H., & Khajenoori, M. (2024). Investigating the effect of magnetic field directions on surface properties and corrosion of 304SS steel surfaces prepared by magnetoelectropolishing method. *Applied Chemistry Today*, 19(72), 55-70. (in Persian)

بررسی تاثیر جهت‌های میدان مغناطیسی بر خواص سطحی و خوردگی سطوح استیل

SS ۳۰۴ آماده شده به روش مگنتوالکتروپولیش

سحر کیانی^۱، حمیدرضا معظمی^۲، مریم خواجه‌نوری^{۳*}^۱گروه شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران^۲پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فناوری هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳	<p>در این پژوهش، از روش مگنتوالکتروپولیش برای آماده سازی سطح استیل SS ۳۰۴ استفاده شده است. فرایند الکتروپولیش در حالت‌های مختلف شامل بدون میدان مغناطیسی، نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت خارج، نیروی لورنتسی به موازات سطح و نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت داخل انجام شده است. از روش‌های میکروسکوپی الکترونی روبشی، میکروسکوپی نیروی اتمی، تست پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی برای بررسی مورفولوژی سطحی، ترکیب عنصری، زبری سطح و مقاومت خوردگی نمونه‌ها در هر حالت استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل، جهت میدان مغناطیسی و در واقع جهت جریان هیدرودینامیک حاصل از نیروی لورنتسی سهم تعیین کننده‌ای در خواص سطحی نمونه همچون مورفولوژی، زبری و مقاومت در برابر خوردگی دارد. بهترین نتایج در زمانی رخ داد که نیروی لورنتسی به موازات سطح باشد. در این حالت، میزان آهن در سطح به ۶۹/۹۴٪ می‌رسد که نسبت به سایر حالات قرارگیری میدان مغناطیسی کمترین مقدار است و مقدار آهن نیز در حالتی که میدان مغناطیسی وارد سیستم نشده ۷۳/۵۳٪ است که نشان دهنده بهبود در مقاومت خوردگی است. همچنین نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نیز تایید می‌کند که بیشترین نرخ برداشت زمانی است که نیروی لورنتسی به موازات سطح قرار گیرد. بر اساس نتایج حاصل، روش مگنتوالکتروپولیش یک روش کارآمد برای بهبود خواص سطحی و مقاومت خوردگی فولاد زنگ نزن پیشنهاد می‌شود.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳	
واژگان کلیدی:	
پولیش الکتریکی، مگنتوالکتروپولیش، میدان مغناطیسی، خواص ضد خوردگی	
DOI: https://doi.org/10.22075/chem.2024.32670.2237	
This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)	

۱- مقدمه

فرایند الکتروپولیش که برای چندین دهه شناخته شده است، خواص سطح فلز را بدون تأثیر بر خواص حجمی آن اصلاح می‌کند. در این فرایند، یک لایه نازک از سطح فلز به کمک اکسایش با جریان الکتریکی برداشته شده و یک سطح تمیز با خواص مطلوب حاصل می‌شود. فلزات و آلیاژهایی که تحت فرایند الکتروپولیش قرار می‌گیرند صاف‌تر، تمیزتر و مقاوم‌تر در برابر خوردگی می‌شوند. همچنین برای فولاد ضد زنگ، الکتروپولیش لایه سطحی روئین مرتبط با اکسید کروم روی سطح را غنی می‌کند [۱، ۲]. در این روش، سطح در مقیاس میکروسکوپی صیقلی می‌شود. همچنین، در بسیاری از آلیاژهای فلزی و غیرفلزی، مقاومت در برابر خوردگی و روئین‌سازی فلز نیز افزایش می‌یابد. فرایند الکتروپولیش در واقع پرداخت سطح در

مقیاس میکرو سکویی و ماکرو سکویی می‌باشد. در مقیاس میکرو سکویی درخشندگی و در مقیاس ماکرو سکویی صافی قطعه افزایش می‌یابد. الکتروپولیش مواد، فلزات و آلیاژها یکی از پرکاربردترین عملیات‌های تکمیلی است، به ویژه در مورد عملیات سطحی مواد زیستی فلزی با اشکال پیچیده مانند استنت‌های عروقی و پروتزها که انجام فرایند پولیش مکانیکی بر روی آنها به دلیل شکل ظاهری دشوار است. در مواد فلزی، علاوه بر زبری سطح کم و درخشندگی مناسب، مقاومت خوردگی بالا و عدم وجود عناصر سرطان‌زا در لایه سطحی نیز از اهمیت بالایی برخوردار هستند. مطالعات فرآیند الکتروپولیش در حضور میدان مغناطیسی از مدتی پیش آغاز شده است [۶-۳]. پیش از آن، میدان مغناطیسی عمدتاً برای بهبود فرآیندهای پوشش دهی الکتروشیمیایی استفاده شده است [۷، ۸].

با اعمال میدان مغناطیسی به سیستم، فرآیند الکتروپولیش پیچیده‌تر می‌شود. در این سیستم جدید، از نیروی مغناطیسی خارجی اعمال شده برای تسریع یا کند کردن فرآیند انحلال استفاده شده است. فرآیند الکتروپولیش در کنار متصاعد شدن اکسیژن سبب کاهش زبری، افزایش مقاومت خوردگی، به حداقل رساندن کثیفی سطح خارجی و بهبود قابلیت تمیز کردن در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر می‌شود [۱، ۹].

اولین استفاده موثر از میدان مغناطیسی برای فرآیند الکتروپولیش توسط روکیکی گزارش شد [۱۰]. این فرایند، تحت عنوان مگنتوالکتروپولیش^۱ به ثبت رسیده است. توسعه مطالعه مگنتوالکتروپولیش توسط هرینویچ و همکاران انجام گردید [۱۱]. میدان‌های مغناطیسی یکنواخت با استفاده از آهنرباهای دائمی یا آهنرباهای الکترومغناطیسی ایجاد می‌شوند [۱۲]. میدان مغناطیسی اعمال شده خارجی به دو صورت عمل می‌کند: افزایش و یا کاهش سرعت انحلال. تغییر در سرعت انحلال به خواص مغناطیسی محلول یا ترکیب الکترولیت بستگی ندارد. در مقابل، به قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده خارجی بستگی دارد [۱۳].

هنگامی که مگنتوالکتروپولیش در حالت پتانسیل ثابت انجام می‌شود، فرآیند از اصول انتشار عادی پیروی می‌کند. میدان مغناطیسی نیروی لورنتس را ایجاد می‌کند که حاصل ضرب میدان مغناطیسی و جریان است. اثر مکانیکی این نیرو باعث می‌شود که الکترولیت حول محور موازی جهت میدان مغناطیسی بچرخد. حرکت چرخشی ضخامت لایه انتشار یا لایه چسبناک را کاهش می‌دهد. از نظر تئوری، کاهش ضخامت باید با افزایش سرعت انتقال جرم، فرآیند انحلال را سرعت بخشد. این اثر همچنین با افزایش چگالی جریان خود را نشان می‌دهد [۱۴].

تحقیقاتی برای توصیف اثرات میدان‌های مغناطیسی در تغییر مشخصات مکانیکی و بهبود عملکرد قطعات ساخته شده انجام شده است [۱۵، ۱۶]. این اثرات بر روی خواص مواد همچنین نشان می‌دهد که میدان‌های مغناطیسی را می‌توان برای بهبود

¹ Magneto-electropolish

فرآیندهای تریبولوژیکی استفاده کرد زیرا مکانیک فرآیند به خواص مواد بستگی دارد؛ هنگامی که مگنتوالکتروپولیش در پتانسیل متصاعد شدن اکسیژن انجام می‌شود، چگالی جریان کاهش می‌یابد و نرخ انحلال آندی مواد کمتر می‌شود. این کاهش نرخ انحلال به قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده خارجی بستگی دارد. از سوی دیگر، هنگامی که مگنتوالکتروپولیش تحت یک پتانسیل ثابت زیر پتانسیل متصاعد شدن اکسیژن انجام شود، چگالی جریان افزایش یافته و منجر به نرخ حذف مواد بالاتر می‌شود [۶]. روش مگنتوالکتروپولیش برای بهبود خواص هیدروژن دار شدن تیتانیوم در کاربردهای زیست‌موادی به کار گرفته شده است [۱۷]. همچنین، این روش برای بهبود سطح آلیاژ نیکل-تیتانیوم برای کاربرد به عنوان استنت مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸]. در این پژوهش به بررسی و مقایسه مگنتوالکتروپولیش در شرایط مختلف با الکتروپولیش ساده و همچنین بررسی تاثیر جهت‌های قرارگیری میدان لورنتسی نسبت به سطح پرداخته شد و نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنجی پرتو ایکس انرژی، میکروسکوپ نیروی اتمی و همچنین مقامت خوردگی هر یک به‌طور کامل مورد بحث قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و دستگاه‌ها

اسید سولفوریک، اسید فسفریک و کلرید سدیم از شرکت مرک آلمان تهیه شد. برای ثبت تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دستگاه زایس مدل EVO۱۸ ساخت آلمان مجهز به آشکارساز اشعه ایکس انرژی تفکیک شده استفاده شد. از یک میکروسکوپ نیروی اتمی مارک NT-MDT مدل ۱۵۰TS ساخت ایران برای ثبت تصاویر مربوط استفاده شد. تست‌های پلاریزاسیون پتاسیو دینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات اتولب مدل ۳۰۲ N انجام شد.

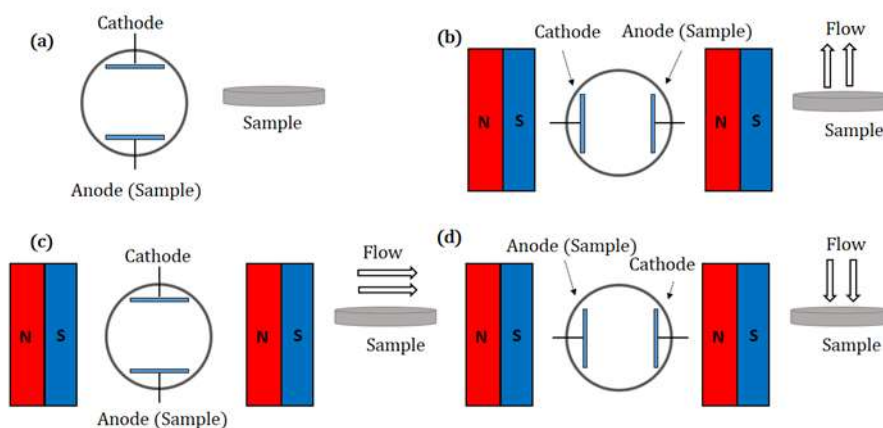
۲-۲- آماده سازی سطح نمونه‌ها

در ابتدا برای تمیز کردن سطح از چربی‌های خارجی و خطوط سطحی، سطح را بصورت مکانیکی به مدت ۵ دقیقه پولیش کرده که تا حد امکان خطوط احتمالی از بین بروند سپس به مدت ۱۰ دقیقه در محلول اتانول، استون و آب مقطر به نسبت ۱:۱:۱ درون حمام اولترا سونیک قرار گرفته تا چربی‌های سطح از بین برود و در نهایت نمونه‌ها آماده‌ی پولیش شدن بصورت الکتریکی و مغناطیسی خواهند شد.

۲-۳- شرح آزمایش

فرایند الکتروپولیش در حمام شامل $H_3PO_4:H_2O:H_2SO_4$ به نسبت ۲:۱:۱ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی جریان 10 A.cm^{-2} انجام شد. مساحت سطح نمونه‌ها نیز برابر با $2/54 \text{ cm}^2$ بود. مدت زمان الکتروپولیش در تمام وضعیت‌ها min

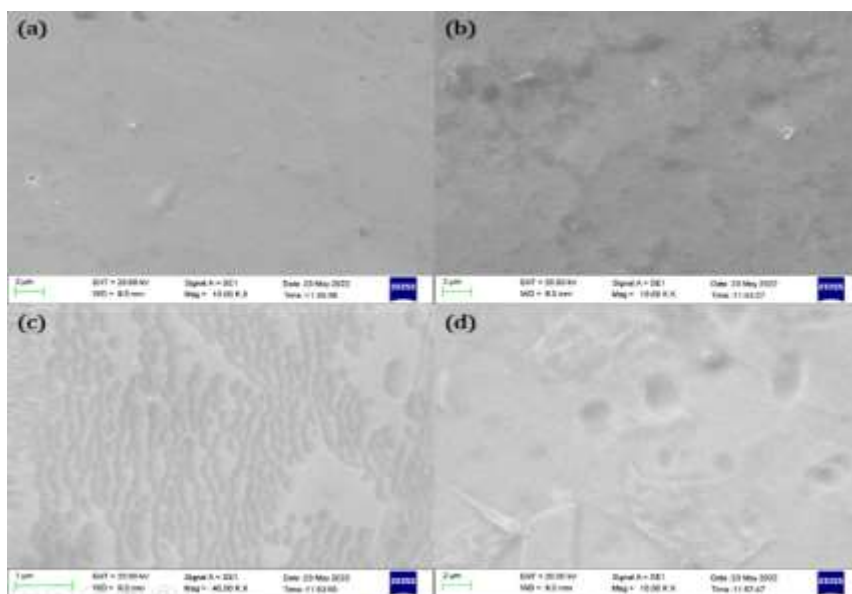
۱ انتخاب شد. پس از انجام فرایند الکتروپولیش نمونه‌ها از حمام خارج شده و برای تشکیل لایه اکسیدی رویین به مدت ۲۴ h در دمای اتاق نگهداری شد. برای مگنتوالکتروپولیش از یک سل مخصوص مجهز به دو مگنت دائمی نئودیمیوم/آهن با میدان مغناطیسی ۱ T استفاده شد. با خارج کردن یا چرخش سل، فرایند الکتروپولیش در ۴ و وضعیت مختلف مطابق شکل ۱ انجام شد. در وضعیت اول (شکل ۱(a)) که به عنوان شاهد و به منظور بررسی اثر مغناطیسی انجام شد، مگنت‌ها خارج شده و فرایند الکتروپولیش در غیاب میدان انجام شد. در وضعیت دوم، جهت میدان مغناطیسی و الکترودها به گونه‌ای تنظیم شد که جهت نیروی لورنتسی و جریان هیدرودینامیک حاصل از آن عمود بر نمونه و به سمت خارج باشد (شکل ۱(b)). وضعیت سوم شامل قرارگیری مگنت‌ها و الکترودها برای ایجاد جریان هیدرودینامیکی بر شی بر سطح نمونه مطابق شکل ۱(c) است. در نهایت، چیدمان مگنت و الکترودها به شکلی انجام شد که جهت نیروی لورنتسی و جریان هیدرودینامیک عمود بر سطح نمونه و به سمت آن باشد (شکل ۱(d)).



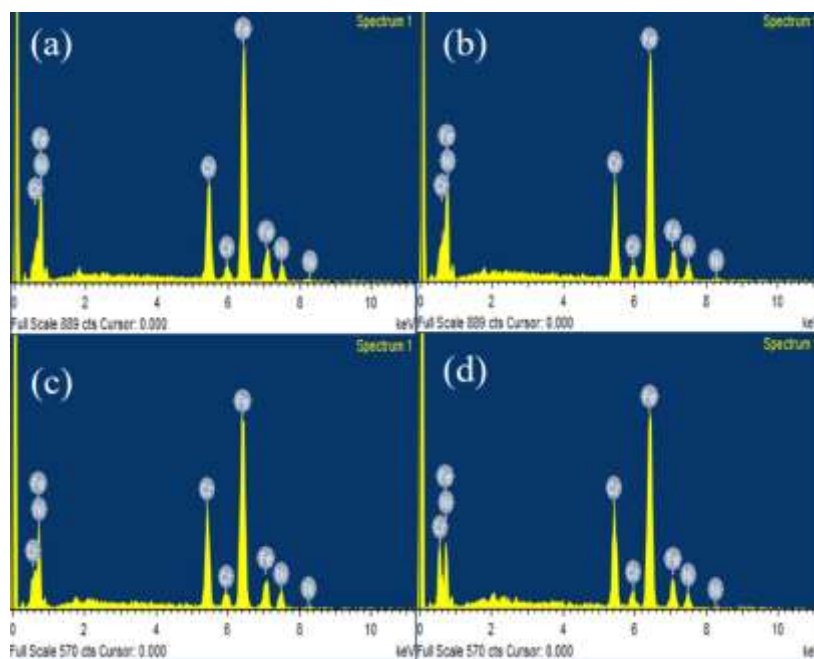
شکل ۱- وضعیت قرارگیری مگنت‌ها نسبت به الکترودهای کار و الکترودهای مقابل در فرایند الکتروپولیش.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

برای بررسی خواص سطحی نمونه‌های الکتروپولیش شده از میکروسکوپی الکترونی روبشی استفاده شد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده می‌شود در شکل (a) پولیش الکتریکی ساده اتفاق افتاده، در شکل (b) ۲ تغییر قابل توجهی نسبت به حالت (a) مشاهده نمی‌شود، در شکل (c) ۲ حالت شسته شدن از سطح و به اصطلاح جاروب اتفاق افتاده و در شکل (d) ۲ بصورت ضربه‌ای نیرو وارد شده است که نوع حرکت جریان را نشان می‌دهد. همچنین برای یافتن درصد عناصر از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس استفاده شد. نتایج آن در شکل ۳ و جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه های مگنتوالکتروپولیش شده در شرایط مختلف شامل بدون میدان مغناطیسی (a)، نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت خارج (b)، نیروی لورنتسی به موازات سطح (c) و نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت داخل (d).

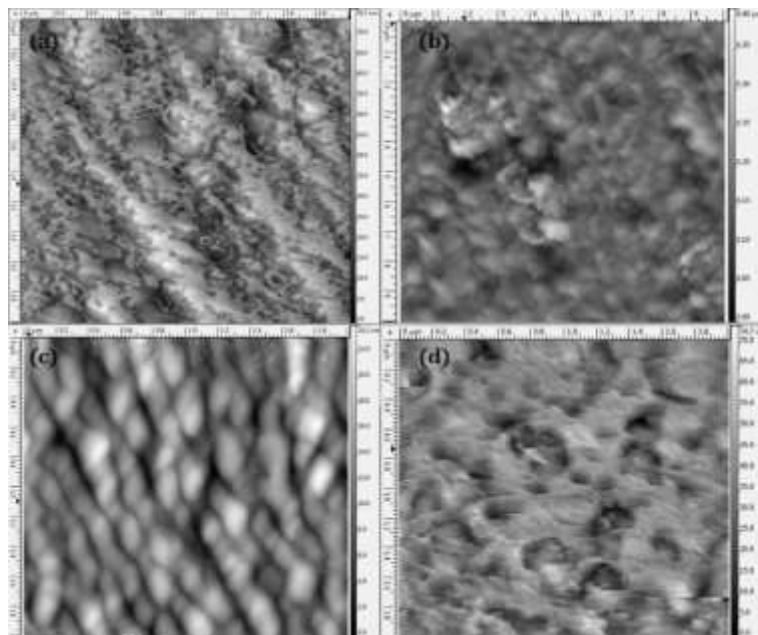


شکل ۳- تصاویر طیف سنجی پرتو ایکس انرژی تفکیک شده بدون میدان مغناطیسی (a)، نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت خارج (b)، نیروی لورنتسی به موازات سطح (c) و نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت داخل (d).

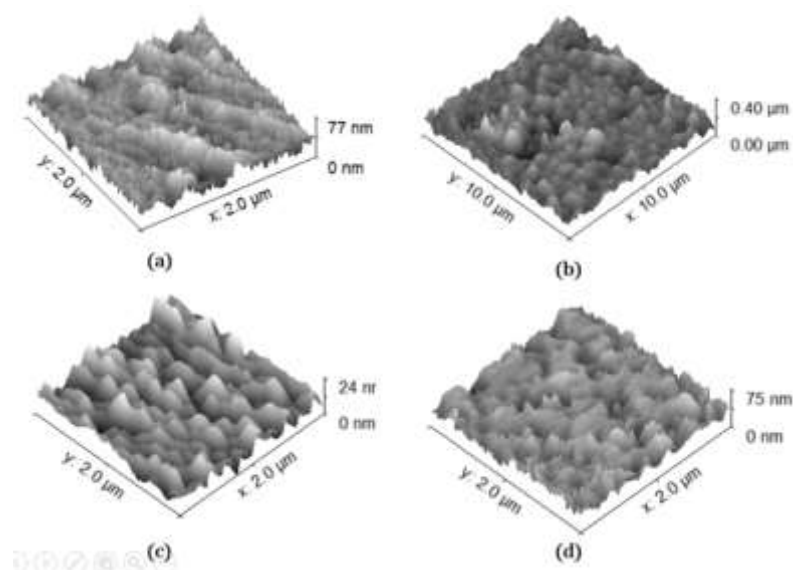
جدول ۱. داده های بدست آمده از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس

	Cr-K	Fe-K	Ni-K
a	۱۸/۳۳	۷۳/۵۲	۸/۱۵
b	۱۹/۰۷	۷۲/۸۴	۸/۰۹
c	۲۰/۴۱	۶۹/۹۴	۹/۶۵
d	۲۱/۳۰	۷۰/۴۰	۸/۳۱

با توجه به داده‌های بدست آمده از طیف سنجی پرتو ایکس انرژی تفکیک شده، مقدار آهن در حالت الکتروپولیش در غیاب میدان مغناطیسی بیشترین مقدار (۷۳/۵۲ درصد) است. زمانی که میدان مغناطیسی به فرایند الکتروپولیش وارد شد مقدار فلز آهن کاهش می‌یابد که کمترین مقدار آهن در زمانی رخ داده که نیروی لورنتسی به موازات سطح باشد و این مقدار برابر با (۶۹/۹۴ درصد) است و بیانگر نوع حرکت جریان لورنتسی است همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است. همچنین ریخت شناسی و زبری سطحی نمونه‌های مگنتوالکتروپولیش شده در شرایط مختلف به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۴ تصاویر دوبعدی میکروسکوپ نیروی اتمی را برای حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. تصاویر دو بعدی در تطابق با نتایج میکروسکوپی الکترونی روبشی بوده و حرکت جریان از سطح را بخوبی تایید می‌کند.



شکل ۴- تصاویر دوبعدی میکروسکوپ نیروی اتمی برای حالت‌های مختلف شامل بدون میدان مغناطیسی (a) ، نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت خارج (b) ، نیروی لورنتسی به موازات سطح (c) و نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت داخل (d).



شکل ۵- تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی برای حالت‌های مختلف شامل بدون میدان مغناطیسی (a) ، نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت خارج (b) ، نیروی لورنتسی به موازات سطح (c) و نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت داخل (d).

در جدول ۲ اطلاعات بدست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی و داده‌های آماری وابسته به آنها نشان داده شده است.

جدول ۲. داده‌های آماری بدست آمده از تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی

Sample	Average value (nm)	Rms Roughness (nm)	Mean Roughness (nm)	Skew Ssk	Excess Kurtosis Sku
a	۱۶/۰۳	۳۹/۰۲	۲۹/۲۴	۰/۰۶۸	-۰/۲۴۷
b	۳۶/۶	۱۱/۲۹	۹/۱۵	۰/۳۲۷	۱/۶۳۴
c	۱۱/۲۱	۴/۰۴	۳/۲۴۳	-۰/۱۷۹	۰/۱۸۷
d	۳۶/۱۹	۹/۱۴۴	۷/۳۲۵	۰/۳۶۴	-۰/۱۱۸

با توجه به داده‌های آماری بدست آمده از تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی مقدار زبری میانگین در غیاب مغناطیسی برابر با $39/02 \text{ nm}$ است با اعمال میدان مغناطیسی مقدار زبری میانگین دچار کاهش چشمگیری می شود که کمترین مقدار آن در حالت c (نیروی لورنتسی به موازات سطح) که برابر با $4/04 \text{ nm}$ است که بخوبی نظریه فیلم چسبناک را تایید می کند. همچنین مقدار عدد چولگی در نمونه‌ای که نیروی لورنتسی به موازات سطح رخ داده است برابر با $-0/179$ است و منفی بودن آن بیانگر است که سطح تحت جاروب قرار گرفته است. نتایج در جدول ۱ و شکل ۲ نیز تایید کننده این موضوع است.

همانطور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قابل مشاهده است، اعمال میدان مغناطیسی نیروی لورنتسی بر حرکت یون‌ها تاثیر گذار و یک جریان همرفتی در محلول الکترولیت نزدیک سطح الکتروود القا می کند که به آن اثر هیدرودینامیک مغناطیسی^۱ گویند [۱۹]. هنگامی که میدان مغناطیسی به یک سلول شیمیایی اعمال شود، نیروی لورنتسی که عمود بر میدان

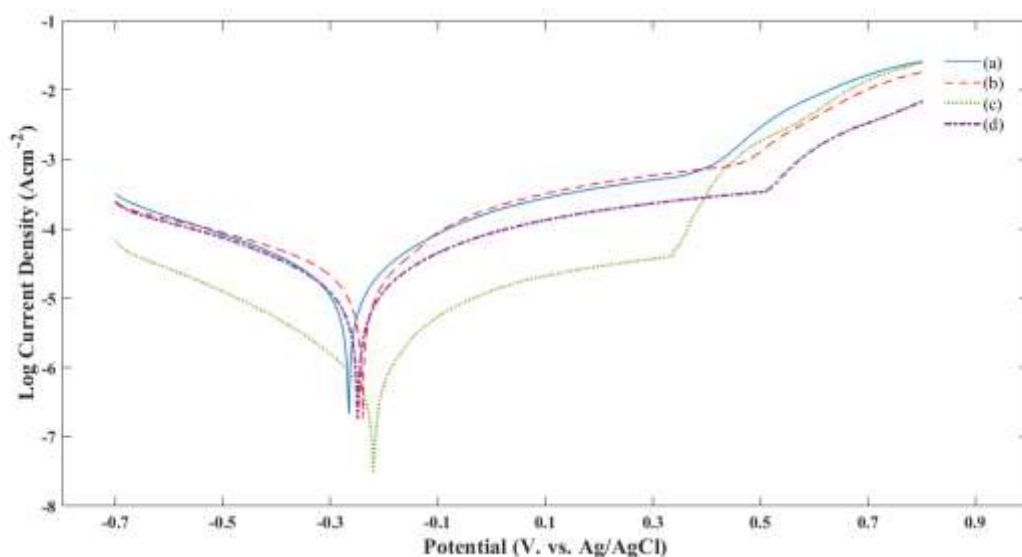
¹ Magneto Hydrodynamic effect(MHD)

مغناطیسی و چگالی جریان است بر تمامی ذرات باردار موجود در محلول وارد می‌شود و این نیرو نوعی جریان همرفتی در محلول ایجاد می‌کند که باعث کاهش ضخامت لایه نفوذی و افزایش نرخ لایه نشانی می‌شود. اگر میدان مغناطیسی موازی با سطح الکتروود بر پیل الکتروشیمیایی اعمال شود، نیروی لورنتزی و در نتیجه انتقال جرم ناشی از جریان همرفتی و حرکت یون‌ها در محلول الکتروولیت به حداکثر مقدار خود می‌رسد [۲۰]. "نظریه فیلم چسبناک (ویسکوز)" توسط ژاکت برای توصیف مکانیسم حذف مواد در الکتروپولیش پیشنهاد شد [۲۱]. اگرچه این تئوری برای توضیح فرآیند پیچیده پولیش بسیار ساده بود، اما افق جدیدی برای الکتروپولیش و مگنتوالکتروپولیش فراهم کرد و به عنوان پایه‌ای برای نظریه‌های توسعه یافته‌تر عمل کرد. شکل ۶ نمودار شماتیک "نظریه فیلم چسبناک" را نشان می‌دهد. یک فیلم چسبناک بر روی سطح قطعه کار به دلیل محصولات انحلال تشکیل می‌شود. این فیلم با کاهش چگالی جریان به دلیل مقاومت الکتریکی بالا، سرعت حذف مواد را محدود می‌کند. همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، ژاکت فرض کرد سطح لایه‌های چسبناک که در تماس با الکتروولیت قرار گرفته بنابراین، ضخامت لایه چسبناک حتی به دلیل سطح ناصاف قطعه کار نیست. لایه چسبناک در موقعیت دره نسبتاً ضخیم است و به دلیل مقاومت الکتریکی بالا و توزیع پتانسیل کم، انحلال مواد کند است. برعکس، فیلم چسبناک در موقعیت بیرون زدگی نازک است و به دلیل توزیع پتانسیل بالا، انحلال مواد سریع است. اختلاف توزیع پتانسیل در موقعیت‌های بیرون زده و دره، به دلیل نرخ‌های مختلف انحلال مواد، یک اثر هموار کننده روی سطح ایجاد می‌کند.



شکل ۶- نمودار شماتیک "تئوری فیلم چسبناک"

جهت بررسی دقیق‌تر مقاومت خوردگی نمونه‌های تهیه شده از روش پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک استفاده شد. از یک سیستم سه الکتروودی شامل الکتروود مرجع/نقره/کلرید نقره، الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود کمکی و لایه مورد مطالعه به عنوان الکتروود کار برای انجام آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک استفاده شد. آزمایش‌ها در الکتروولیت سدیم کلرید ۳/۵٪ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با سرعت روبش ۱ میلی‌ولت بر ثانیه در محدوده پتانسیل ۰/۷- تا ۰/۸+ (نسبت به الکتروود مرجع نقره/کلرید نقره) انجام شد. شکل ۷ نمودار نتایج بدست آمده را در حالت‌های بیان شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در حالات مختلف شامل بدون میدان مغناطیسی (a) ، نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت خارج (b) ، نیروی لورنتسی به موازات سطح (c) و نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت داخل (d).

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، در حالتی که نیروی لورنتسی به موازات سطح باشد جریان هیدرودینامیکی باعث شسته شدن سطح شده و ضخامت لایه انتشار را کاهش داده و در نتیجه سرعت انتقال جرم را افزایش داده و نیز آهن بیشتری از سطح شسته شده و مقدار کروم و نیکل در سطح بیشتر است (طبق جدول ۱). زمانی که نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت خارج است نسبت به سه حالتی که میدان مغناطیسی به سیستم وارد شده است مقدار بیشتری آهن در سطح وجود دارد که بیان کننده این است که مقاومت خوردگی حداقل مقدار خود را دارد.

جدول ۳. مقادیر پتانسیل خوردگی، چگالی جریان خوردگی، شیب آندی و کاتدی.

	E_{corr} (V. vs Ag/AgCl)	I_{corr} (A. cm ⁻²)	β_a (V/decade)	β_c (V/decade)
a	-۰/۲۶۵	$۱/۶۵ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۱۶۲	-۰/۳۸۱
b	-۰/۲۴۹	$۴/۷۹ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۱۳۴	-۰/۱۰۵
c	-۰/۲۲۰	$۱/۱۲ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۲۴۳	-۰/۱۶۴
d	-۰/۲۳۹	$۲/۵۱ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۰۴۹	-۰/۰۲۲

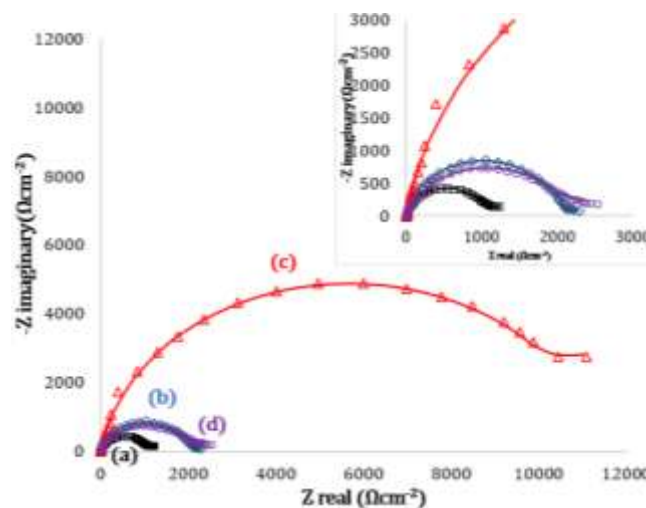
همانطور که در جدول ۳ ذکر شده با وارد شدن میدان مغناطیسی به فرایند پولیش مقدار I_{corr} کاهش می یابد و زمانی که نیروی لورنتسی به موازات سطح است این کاهش به بیشترین مقدار خود می رسد بنابراین می توان نتیجه گرفت حضور میدان مغناطیسی (موازی با سطح) روی سطحی که در معرض محلول خورنده قرار دارد، به میزان قابل توجهی می تواند از طریق هوای به دام افتاده در بین زبری های روی سطح، تماس محلول با سطح را کاهش داده و از نفوذ یون های مهاجم کلرید به سطح زیرلایه جلوگیری کند و در نهایت نقش محافظتی بسیار موثری برای زیرلایه داشته باشد. برای بررسی بیشتر رفتار الکترو شیمیایی پوشش ها از طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد [۲۲]. طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در

الکترولیت مشابه تست‌های پلاریزاسیون، در بازه فرکانس ۱۰ mHz تا ۱۰۰ KHz و در پتانسیل مدار باز^۱ انجام گرفت. دامنه سیگنال سینوسی اعمالی ۵ mV در نظر گرفته شد. شکل ۸ نتایج را به صورت نمودارهای نایکویست در غیاب میدان مغناطیسی و جهت‌های مختلف میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. در مدار معادل الکتروشیمیایی، R_s ، R_{po} و R_{ct} به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت محلول، مقاومت منافذ فیلم روئین و مقاومت انتقال بار هستند. المان‌های فاز ثابت CPE_1 و CPE_2 مربوط به فیلم روئین و لایه دوگانه الکتروکی هستند [۲۳].

در الکتروشیمی، المان فاز ثابت به جای ظرفیت خازنی خالص مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجود CPE اغلب با اثرات پراکندگی که توسط زبری میکروسکوپی سطح ایجاد می‌شود توضیح داده می‌شود. امپدانس المان فاز ثابت با $Z_{CPE} = [1/Y_0(j\omega)^n]$ بیان می‌شود که در آن Y_0 ادمیتانس المان فاز ثابت، ω فرکانس زاویه ای و n عبارت نمایی است. برای یک مقاومت خالص $n = 0$ و برای خازن خالص $n = 1$ است [۱۷].

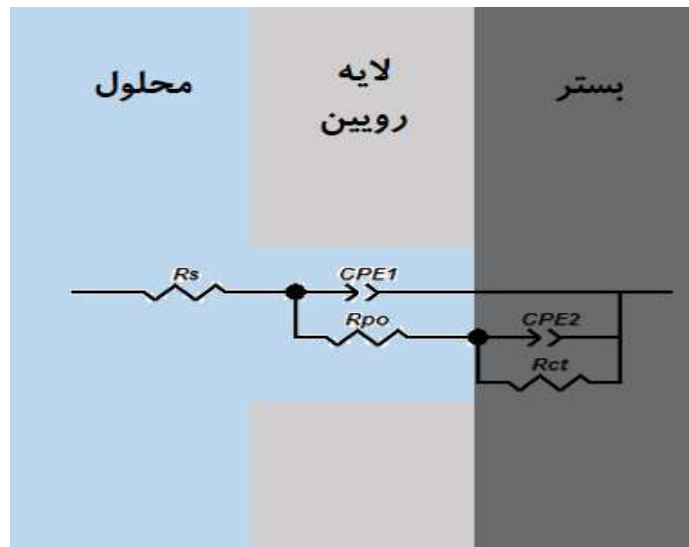
گانش و همکاران اثر اصلاح به همراه سیتریک اسید، نیتریک اسید و نیز اصلاح پتانسیواستاتیک را بر مقاومت خوردگی استیل ss ۳۰۴ در محلول ۳/۵ درصدوزنی NaCl بررسی کردند [۲۴]. در تمامی حالات اصلاح، به دلیل تشکیل فیلم غیر فعال غنی از اکسید کروم، به بهبود قابل توجه مقاومت خوردگی کمک کرده و بیشترین مقاومت خوردگی در زمانیکه از اصلاح پتانسیواستاتیک استفاده شده رخ داده است.

مقادیر المان‌های مدار معادل با استفاده از برازش به دست آمد. جدول ۴ مقادیر المان‌های مدار معادل را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمودارهای نایکویست برای بستر پیش از اعمال میدان مغناطیسی و حالات مختلف اعمال میدان مغناطیسی مختلف شامل بدون میدان مغناطیسی (a)، نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت خارج (b)، نیروی لورنتسی به موازات سطح (c) و نیروی لورنتسی عمود بر سطح به سمت داخل (d).

¹ Open-Circuit Potential (OCP)



شکل ۹- مدار معادل پیشنهادی برای منحنی‌های نایکوئیست شکل ۸

جدول ۴. مقادیر المان‌های مدار معادل برای حالت‌های مختلف

	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$CPE_1 - T$ ($\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$CPE_1 - P$	R_{po} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$CPE_2 - T$ ($\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$CPE_2 - P$	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
a	۱۴/۶۲	$۸/۸۴ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۸۸۷	۹۷۶/۸	$۵/۱۵۸ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۴۹۳	۵۷۶/۳
b	۱۵/۰۴	$۸/۵۴۹ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۸۹۵	۱۹۷۷	$۶/۶۴۴ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۴۳۶	۱۳۴
c	۱۴	$۵/۸۵۱ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۹۲۴	۱۰۸۶۹	$۲/۷۹۱ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۸۵۹	۲۳۷۱
d	۱۲/۷۹	$۱/۲۴۳ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۸۰۰	۱۹۱۰	$۳/۹۷۶ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۳۸۲	۱۲۱۰

مقاومت وابسته به حفره برای نمونه‌های a، b، c و d به ترتیب ۹۷۶/۸، ۱۹۷۷، ۱۰۸۶۹ و ۱۹۱۰ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ و همچنین مقاومت انتقال بار برای این نمونه‌ها به ترتیب ۵۷۶/۳، ۱۳۴، ۲۳۷۱ و ۱۲۱۰ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ محاسبه شد. که در نمونه C بیشترین مقاومت وابسته به حفره و مقاومت انتقال بار دیده می‌شود که با نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مطابقت دارد.

نتایج بدست آمده در تطابق با گزارش‌های پیشین در مورد رفتار الکتروشیمیایی و آنالیز عنصری فولادهای زنگ نزن [۱، ۲۵] است. در پژوهش‌های انجام شده در مورد فولادهای زنگ‌نزن ۳۱۶ [۲۵]، روش مگنتوالکتروپولیش در مقایسه با الکتروپولیش در غیاب میدان مغناطیسی، بهبود معنی داری را در پتانسیل مدار باز نشان داده است. همچنین نتایج طیف نگاری امپدانس شیمیایی در محلول رینگر مقادیر بزرگتری از امپدانس موهومی را در حالت مگنتوالکتروپولیش نشان داده است. با توجه به نتایج آزمون XPS [۲۳] پیک مربوط به آهن کاهش قابل توجهی را در حالت مگنتوالکتروپولیش نشان می‌دهد که در واقع نشان دهنده فروشویی عناصر آهن و نیکل از سطح و افزایش موضعی کروم و در نتیجه افزایش مقاومت خوردگی است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر میدان‌های مغناطیسی با جهات متفاوت را با فرایند الکتروپولیش ساده بر روی سطوح استیل SS ۳۰۴ در الکترولیت $H_3PO_4:H_2O:H_2SO_4$ بررسی کردیم و دریافتیم تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده‌ی نوع حرکت جریان مغناطیسی ناشی از میدان مغناطیسی اعمال شده بر روی سطح است و به‌خوبی نوع جریان قابل رویت است. علاوه بر این نتایج حاصله از میکروسکوپ نیروی اتمی نیز بیانگر کاهش چشمگیر زبری سطح در حالتی که جریان لورنتسی به موازات سطح اتفاق افتاده است. لازم به ذکر می‌باشد که منحنی پلاریزاسیون نمونه‌ها در حالت قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی بیانگر بهبود مقاومت خوردگی با اعمال میدان مغناطیسی است همچنین در زمانیکه جریان لورنتسی به موازات سطح اتفاق افتاده است بیشترین نرخ برداشت آهن مشاهده می‌شود داده‌های بدست آمده از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نیز آنرا تایید می‌کند. در تمام حالت‌ها، نمودارهای نایکویست از الگوی خوردگی موضعی تبعیت می‌کنند بیشترین مقدار مقاومت خوردگی برای نمونه‌ای است که نیروی لورنتسی به موازات سطح دیده می‌شود و نیز نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک تایید کننده این موضوع است که بیشترین نرخ برداشت زمانی رخ داده که نیروی لورنتسی به موازات سطح قرار گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مسئولان محترم آزمایشگاه مرکزی سازمان انرژی و اتمی تهران و گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه سمنان و آزمایشگاه‌های مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Hryniewicz, T., Rokosz, K., & Rokicki, R. (2008). Electrochemical and XPS studies of AISI 316L stainless steel after electropolishing in a magnetic field. *Corrosion Science*, 50(9), 2676-2681.
- [2] Mingear, J., Zhang, B., Hartl, D., & Elwany, A. (2019). Effect of process parameters and electropolishing on the surface roughness of interior channels in additively manufactured nickel-titanium shape memory alloy actuators. *Additive Manufacturing*, 27, 565-575.
- [3] Mingear, J., Zhang, B., Hartl, D., & Elwany, A. (2019). Effect of process parameters and electropolishing on the surface roughness of interior channels in additively manufactured nickel-titanium shape memory alloy actuators. *Additive Manufacturing*, 27, 565-575.
- [4] Hryniewicz, T., Rokosz, K., & Filippi, M. (2009). Biomaterial studies on AISI 316L stainless steel after magneto-electropolishing. *Materials*, 2(1), 129-145.

- [5] Hryniewicz, T., Konarski, P., Rokosz, K., & Rokicki, R. (2011). SIMS analysis of hydrogen content in near surface layers of AISI 316L SS after electrolytic polishing under different conditions. *Surface and Coatings Technology*, 205(17-18), 4228-4236.
- [6] Hryniewicz, T., Rokicki, R., & Rokosz, K. (2011). Magneto-electropolished titanium biomaterial. *Biomaterials Science and Engineering*, 227-248.
- [7] El Mansori, M., & Klamecki, B. E. (2006). Magnetic field effects in machining processes and on manufactured part mechanical characteristics. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 128(1), 136-145.
- [8] Zaidi, H., Amirat, M., Frene, J., Mathia, T., & Paulmier, D. (2007). Magnetotribology of ferromagnetic/ferromagnetic sliding couple. *Wear*, 263(7-12), 1518-1526.
- [9] Hryniewicz, T., Rokosz, K., Valíček, J., & Rokicki, R. (2012). Effect of magneto-electropolishing on nanohardness and Young's modulus of titanium biomaterial. *Materials Letters*, 83, 69-72.
- [10] R. Rokicki, *U.S. Pat. 7632390B2* (2009).
- [11] Rokosz, K., Hryniewicz, T., & Raaen, S. (2014). Cr/Fe ratio by XPS spectra of magneto-electropolished AISI 316L SS fitted by Gaussian-Lorentzian shape lines.
- [12] Hryniewicz, T., Rokicki, R., & Rokosz, K. (2008). Surface characterization of AISI 316L biomaterials obtained by electropolishing in a magnetic field. *Surface and Coatings Technology*, 202(9), 1668-1673.
- [13] Han, W., & Fang, F. (2019). Electropolishing of 316L stainless steel using sulfuric acid-free electrolyte. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(10), 101015.
- [14] Hryniewicz, T., Rokicki, R., & Rokosz, K. (2007). Magneto-electropolishing for metal surface modification. *Transactions of the IMF*, 85(6), 325-332.
- [15] Xiao, Q., Lu, Z., Chen, J., Ma, J., Xiong, Q., Li, H., ... & Shoji, T. (2019). Magneto-electropolishing treatment for improving the oxidation resistance of 316L stainless steel in pressurized water reactor primary water. *Journal of Nuclear Materials*, 518, 357-369.
- [16] Xiao, Q., Chen, J., Lu, Z., Xu, J., & Shoji, T. (2022). Application of Magneto-electropolishing on the Oxidation Resistance Improvement of Stainless Steel Cladding in High-Temperature Water. *Corrosion*, 78(8), 711-725.
- [17] Gill, P., Musaramthota, V., Munroe, N., Datye, A., Dua, R., Haider, W., ... & Rokicki, R. (2015). Surface modification of Ni-Ti alloys for stent application after magneto-electropolishing. *Materials Science and Engineering: C*, 50, 37-44.
- [18] Hryniewicz, T., Konarski, P., Rokicki, R., & Valicek, J. (2012). SIMS studies of titanium biomaterial hydrogenation after magneto-electropolishing. *Surface and Coatings Technology*, 206(19-20), 4027-4031.
- [19] Han, W., & Fang, F. (2019). Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 139, 1-23.

- [20] Ispas, A., Matsushima, H., Plieth, W., & Bund, A. (2007). Influence of a magnetic field on the electrodeposition of nickel-iron alloys. *Electrochimica acta*, 52(8), 2785-2795.
- [21] Oltra, R., & Keddad, M. (1990). Application of EIS to localized corrosion. *Electrochimica Acta*, 35(10), 1619-1629.
- [22] Er, D., Azar, G. T. P., Kazmanlı, K., & Ürgen, M. (2018). The corrosion protection ability of TiAlN coatings produced with CA-PVD under superimposed pulse bias. *Surface and Coatings Technology*, 346, 1-8.
- [23] Ates, M., & Özyılmaz, A. T. (2015). The application of polycarbazole, polycarbazole/nanoclay and polycarbazole/Zn-nanoparticles as a corrosion inhibition for SS304 in saltwater. *Progress in Organic Coatings*, 84, 50-58.
- [24] Ganesh, P., Kumar, A. V., Thinaharan, C., Krishna, N. G., George, R. P., Parvathavarthini, N., ... & Kukreja, L. M. (2013). Enhancement of intergranular corrosion resistance of type 304 stainless steel through a novel surface thermo-mechanical treatment. *Surface and Coatings Technology*, 232, 920-927.
- [25] Lu, Z., Huang, D., & Yang, W. (2005). Probing into the effects of a magnetic field on the electrode processes of iron in sulphuric acid solutions with dichromate based on the fundamental electrochemistry kinetics. *Corrosion science*, 47(6), 1471-1492.

