



Numerical and Experimental Investigation of Electrochemical Machining of Nickel-Based Single Crystal Superalloy

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mehrvar A.^{*1} PhD,

Mirak A.² PhD,

Rezaei M.² MSc

How to cite this article

Mehrvar A, Mirak A, Rezaei M. Numerical and Experimental Investigation of Electrochemical Machining of Nickel-Based Single Crystal Superalloy. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(7):1873-1881.

ABSTRACT

Electrochemical machining (ECM) has unique features and advantages which is a suitable method for machining when surface quality and residual stresses are of importance. Because of various parameters that influence this process, numerical and experimental studies play a key role in feasibility, practical utilization, and selection of optimal machining parameters in different materials and applications. On the other hand, with the high technology used in the casting of nickel-based single crystal superalloys, no grain boundaries are created in the material. Therefore, by improving the mechanical properties of this material, the traditional machining processes are not effective and economical. Also, they cause defects such as residual stresses, tool wear, and poor surface quality. The purpose of this research is to investigate numerically the electrochemical machining on this special superalloy. Comsol software is used for process modeling and numerical analysis. Firstly, the electrical current and voltage in the machining gap are determined, and finally, the workpiece displacement boundary is obtained. Then the numerical conditions of machining parameters are implemented for experimental investigation by electrochemical machining machine. About 8% error between the results of numerical simulation and experimental investigation shows the feasibility and capability of this modern machining for this particular superalloy.

Keywords Electrochemical machining; Nickel-based single crystal superalloy; Finite element method; Simulation

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Shahreza, Isfahan, Iran

²University Complex of Material & Manufacturing Technology, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Shahreza, Isfahan, Iran. Postal Code: 8614956841.
Phone: +98 (31) 53238379
Fax: +98 (31) 53245012
mehrvar@shahreza.ac.ir

Article History

Received: January 15, 2020

Accepted: April 28, 2020

ePublished: July 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Principles of Electrochemical Machining [2] Electrochemical machining of metals: Fundamentals of electrochemical shaping [3] Modeling and parameter optimization in electrochemical machining process: Application of dual response surface desirability approach [4] Effect of solidification process of single crystal on the microstructure and tensile properties of Ni-base superalloy CMSX-4 [5] Optimization of electrochemical machining process parameters: Combining response surface methodology and differential evolution algorithm [6] Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components [7] Investigation of inner-jet electrochemical milling of nickel-based alloy GH4169/Inconel 718 [8] Flow field design and experimental investigation of electrochemical machining on blisk cascade passage [9] Electrochemical dissolution behavior of the nickel-based cast superalloy K423A in NaNO₃ solution [10] Electrochemical deep hole drilling in super alloy for turbine application [11] Electrochemical micromachining of complex shapes on nickel and nickel-based superalloys [12] Electrochemical machining characteristics and resulting surface quality of the nickel-base single-crystalline material LEK94 [13] Microstructural analysis and multi response optimization during ECM of inconel 825 using hybrid approach [14] Dissolution effects with different microstructures of inconel 718 on surface integrity in electrochemical machining [15] Computer simulation system for electrochemical shaping

بررسی عددی و تجربی ماشین کاری الکتروشیمیایی سوپرآلیاژ تک کریستال پایه نیکل

علی مهرور* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی شهرضا، اصفهان،
ایران

علیرضا میرک PhD

مجمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر،
تهران، ایران

محمدرضا رضایی MSc

مجمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر،
تهران، ایران

چکیده

ماشین کاری الکتروشیمیایی به دلیل قابلیت‌ها و مزایای منحصر به فرد، روشی مناسب برای براده برداری در کاربردهایی که کیفیت سطح و تنش‌های پسماند از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، است. با توجه به پارامترهای مختلفی که در این فرآیند تأثیرگذار است، بررسی عددی و تجربی برای امکان‌سنجی و تدوین تکنولوژی براده برداری در مواد و کاربردهای مختلف ضروری است. از سوی دیگر، با تکنولوژی بالایی که در انجماد پیشرفته تولید سوپرآلیاژ تک کریستال پایه نیکل CMSX-4 به کار گرفته می‌شود، هیچ مرز دانه‌ای در ماده ایجاد نمی‌شود. با بهبود خواص مکانیکی این ماده، استفاده از روش‌های سنتی، موثر و مقرون به صرفه نیست. از این رو هدف از این تحقیق، بررسی عددی ماشین کاری الکتروشیمیایی بر روی این سوپرآلیاژ خاص است. از نرم‌افزار کامسول برای مدل سازی فرآیند و تحلیل عددی استفاده شده است. تغییرات پتانسیل و جریان الکتریکی در دهانه ماشین کاری و نهایتاً جابجایی مرز قطعه کار به دست آمده است. سپس آزمون عملی با توجه به شرایط بررسی عددی به کمک دستگاه ماشین کاری الکتروشیمیایی اجرا شده است. خطای حدود ۸٪ بین نتایج شبیه سازی و آزمون عملی نشان دهنده امکان پذیری و توانایی این روش مدرن ماشین کاری برای این سوپر آلیاژ خاص است.

کلیدواژه‌ها: ماشین کاری الکتروشیمیایی، سوپرآلیاژ تک کریستال پایه نیکل، المان محدود، شبیه سازی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

*نویسنده مسئول: mehrvar@shahreza.ac.ir

مقدمه

یکی از روش‌های مدرن ساخت، ماشین کاری الکتروشیمیایی است که در آن براده برداری به کمک الکترولیز یا همان انحلال الکتروشیمیایی رخ می‌دهد. در این فرآیند قطعه کار به قطب مثبت و ابزار به قطب منفی یک منبع تغذیه جریان مستقیم متصل می‌شود. ابزار به سمت قطعه کار حرکت کرده و فاصله بسیار کمی بین آن و کاند به نام دهانه ماشین کاری ایجاد می‌شود. برای تکمیل این مدار الکتریکی و حرکت الکترون‌ها، الکترولیتی که هادی جریان الکتریکی است در فضای دهانه ماشین کاری جاری می‌شود. در این صورت الکترون‌ها حرکت کرده و یون‌ها از سطح قطعه کار جدا شده و در اطراف ابزار، گاز هیدروژن ایجاد می‌شود. با جریان الکترولیت و شست و شوی فضای دهانه ماشین کاری،

دور شدن یون‌ها و هیدروکسیدهای فلزی از محل ماشین کاری صورت می‌پذیرد. از جمله ویژگی‌ها و مزایای منحصر به فرد این روش، عدم ایجاد سایش در ابزار است. خواص مکانیکی قطعه کار تأثیری بر براده برداری ندارد، از این رو با ابزار نرم مانند مس یا برنج، ماشین کاری قطعات بسیار سخت مانند سوپر آلیاژهای پایه تیتانیوم و نیکل انجام می‌شود. با توجه به سرد بودن فرآیند و عدم تماس ابزار و قطعه کار تنش مکانیکی و حرارتی در قطعه کار ایجاد نمی‌شود و مشکلات ناشی از منطقه متأثر از حرارت که در روش‌های مشابه مانند ماشین کاری تخلیه الکتریکی از معایب قطعه کار است، در این روش وجود ندارد. کیفیت سطح بالا (زبری سطح پایین) در این روش قابل دستیابی است که سبب افزایش عمر خستگی برای قطعه کار می‌شود [1, 2].

سوپر آلیاژ CMSX-4 نسل دوم سوپرآلیاژهای پایه نیکل است که در ساخت انواع پره‌های توربین گازی هوایی و زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که مرز دانه‌ها اصولاً از نقاط ضعف آلیاژ در دماهای کاری بالا محسوب می‌شوند، بنابراین ساختارهای پلی کریستال به دلیل حضور مرز دانه، از خواص مکانیکی دما بالای قابل توجهی برخوردار نیستند. از طرف دیگر این سوپرآلیاژ تک کریستال که نمونه توسعه یافته CMSX-2 است دارای بازه خواص مطلوب شامل استحکام خزشی و خستگی مکانیکی و حرارتی بالا، پایداری فازی خوب، همراه با مقاومت زیاد در برابر خوردگی و اکسیداسیون داغ برای کاربردهای پره‌های توربین گازی است [3].

با توجه به بررسی‌های صورت پذیرفته، فعالیتی در زمینه ماشین کاری الکتروشیمیایی این سوپرآلیاژ خاص پایه نیکل در دسترس نیست. همچنین برای به کارگیری این روش مدرن ماشین کاری جهت براده برداری این ماده، بررسی عددی و سپس پیاده سازی عملی فرآیند از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است [4].
[5]. در ادامه به بررسی برخی تحقیقات صورت پذیرفته در زمینه ماشین کاری الکتروشیمیایی سوپرآلیاژها (به خصوص پایه نیکل) پرداخته شده است.

نرخ براده برداری بالا و کیفیت سطح ماشین کاری الکتروشیمیایی مناسب برای سوپرآلیاژهای پایه نیکل و تیتانیوم که به صورت گسترده در پرها و دیسک‌های موتورهای جت مورد استفاده قرار می‌گیرند، توسط کلوک و همکاران گزارش شده است [6]. در این تحقیق تمرکز بر روی طراحی ابزار و تعیین انحلال الکتروشیمیایی براساس پیش روی ابزار و چگالی جریان الکتریکی مصرفی است. سوپرآلیاژهای پایه نیکل مورد بررسی Inconel 718، Inconel 718 DA، René 88، Waspaloy، IN 100 است که در واقع فعالیتی بر روی سوپرآلیاژ تک کریستال صورت پذیرفته است. از جمله نتایج به دست آمده در مورد سوپرآلیاژهای پایه نیکل این بوده که برای میکروساختارها با دانه بندی منظم قابلیت ماشین کاری الکتروشیمیایی بهتری ایجاد می‌شود. همچنین با بررسی صورت گرفته بر روی این سوپرآلیاژها رفتار خوب ماشین کاری

پایین بر روی این سوپرآلیاژ پایه نیکل ایجاد شده است. سینگ و همکاران^[13]، به تحلیل میکروساختار و بهینه سازی چنددهه ماشین کاری الکتروشیمیایی سوپر آلیاژ Inconel 825 به کمک یک روش ترکیبی پرداختند. پارامترهای ولتاژ، غلظت الکترولیت و پیشروی ابزار به عنوان ورودی های بهینه سازی و توابع نرخ براده برداری، زبری سطح و اضافه ماشین کاری به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. در نهایت ولتاژ ۱۶ ولت، غلظت ۴۵ گرم در لیتر و پیشروی ۳/۰ میلی متر بر دقیقه به عنوان شرایط بهینه ماشین کاری ارایه شده است.

همچنین ثرو و همکاران^[14]، روش ماشین کاری الکتروشیمیایی را به عنوان یک روش موثر و اقتصادی در ماشین کاری سوپرآلیاژ پایه نیکل Inconel 718 معرفی می کنند.

در ادامه به بررسی عددی فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی در براده بردای سوپرآلیاژ تک کریستال پایه نیکل در نرم افزار کامسول و سپس به پیاده سازی عملی و اجرای ماشین کاری الکتروشیمیایی بر روی این ماده پرداخته شده است.

بررسی عددی ماشین کاری الکتروشیمیایی

معادلات و رابط حاکم بر فرآیند

روابط اساسی و اصلی حاکم در این فرآیند قانون فارادی، معادله لاپلاس و قانون اهم است. قانون فارادی به صورت رابطه زیر بیان می شود^[15]:

$$m = \frac{AIt}{zF} \quad (1)$$

در رابطه بالا m ماده حل شده است که با جریان عبوری I در مدت زمان t براده برداری می شود. A وزن اتمی و z ظرفیت ماده است. $\frac{A}{z}$ را اکی والان شیمیایی و F ثابت فارادی و مقدار آن برابر ۹۶۵۰۰ کولومب است. نتایج حاصل از قانون فارادی در الکترولیز شامل موارد زیر می شود^[15]:

۱- میزان ماده براده برداری و رسوب شده مستقیماً به میزان جریان الکتریکی جاری بستگی دارد.

۲- میزان ماده حل شده و رسوب شده در مواد مختلف در یک جریان الکتریکی ثابت به وزن اکی والان گرم شیمیایی بستگی دارد. تا هنگامی که فرآیند الکتروشیمیایی رخ می دهد، میزان انحلال به وزن اتمی، ظرفیت یونی، جریان الکتریکی عبوری و زمانی که جریان عبور می کند بستگی دارد و به سختی و دیگر پارامترهای ماده بستگی ندارد و تا زمانی که فقط گاز هیدروژن در کاتد ایجاد می شود، سایش و تغییری در الکتروود دیده نمی شود.

معادلات اساسی دیگر در فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی معادله لاپلاس است که به صورت زیر بیان می شود^[15]:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

معادله بالا برای دهانه ماشین کاری برقرار است. با حل این معادله، پتانسیل ϕ در هر نود (نقطه) در الکترولیت (دهانه ماشین کاری) به ویژه در سطح قطعه کار به کمک روش عددی (المان محدود) به دست می آید.

الکتروشیمیایی و نرخ براده برداری موثر گزارش شده است.

نیو و همکاران^[7]، در پژوهشی بر روی ماشین کاری الکتروشیمیایی سوپرآلیاژ پایه نیکل GH4169/Inconel 718 فعالیت داشته اند. آزمایش ها نشان داده است که نرخ براده برداری، کیفیت سطح و دهانه ماشین کاری یکنواخت با افزایش نرخ پیشروی بهبود می یابد. همچنین روشی برای جریان الکترولیت به صورت جت برای فرزکاری الکتروشیمیایی بر روی این سوپرآلیاژ پایه نیکل ارایه شده است که بهره وری و ثبات خوب به خصوص برای براده برداری با عمق زیاد داشته است.

همچنین در مطالعه دیگری تاثیر نحوه جریان الکترولیت بر عملکرد ماشین کاری الکتروشیمیایی بلیسک به صورت عددی و تجربی بررسی شده است^[8]. عملکرد این فرآیند برای ماشین کاری بلیسک تا ۷۰٪ با تغییر نحوه جریان الکترولیت بهبود می یابد.

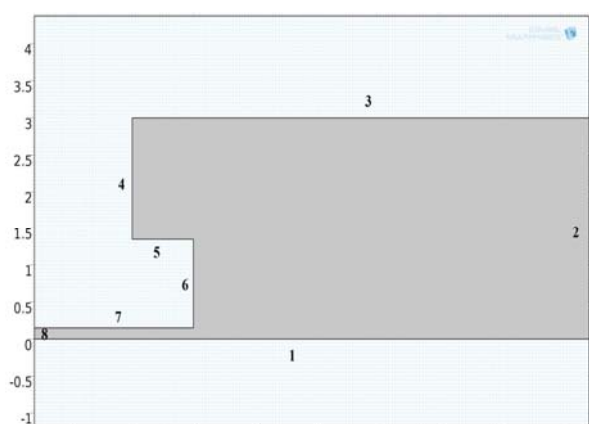
در پژوهشی دیگر، جه و همکاران^[9] به بررسی رفتار انحلال الکتروشیمیایی بر روی سوپرآلیاژ پایه نیکل K423A در الکترولیت نیترات سدیم پرداخته اند. به این مهم اشاره شده است که ماشین کاری الکتروشیمیایی روشی موثر برای ماشین کاری سوپرآلیاژهای پایه نیکل است که تحقیقات کمی در این زمینه صورت گرفته است. عملکرد نیترات سدیم به عنوان الکترولیت، بهتر از کلرید سدیم و غلظت مناسب برای آن ۱۰٪ گزارش شده است. در نهایت روش ماشین کاری الکتروشیمیایی به عنوان فرآیندی موثر و کم هزینه برای براده برداری سوپر آلیاژ پایه نیکل K423A معرفی شده است.

بیلگی و همکاران^[10]، سوراخ کاری به کمک روش ماشین کاری الکتروشیمیایی بر روی سوپرآلیاژ پایه نیکل را بررسی کردند. سوراخ هایی به عمق ۲۶ میلی متر و قطر حدود ۲ تا ۴ میلی متر ایجاد شده است.

هانگ و لیو^[11]، میکرو ماشین کاری الکتروشیمیایی برای ایجاد اشکال پیچیده بر روی سوپرآلیاژ پایه نیکل را مورد بررسی قرار دادند. با ایجاد پالس هایی در مقیاس نانو، اشکال پیچیده ای در ابعاد میکرو بر روی سوپرآلیاژ پایه نیکل ایجاد شده است. پارامترهای ولتاژ، پالس روشنایی و قطر الکتروود مورد بررسی و نهایتاً براده برداری اشکال پیچیده انجام شد.

بورگر و همکاران^[12]، ماشین کاری الکتروشیمیایی سوپرآلیاژ تک کریستال LEK94 که تنها گزارش موجود در زمینه ماشین کاری الکتروشیمیایی سوپرآلیاژهای تک کریستال است را مورد تحقیق قرار دادند. چگالی جریان مهم ترین و موثرترین پارامتر ماشین کاری برای بهبود کیفیت سطح بیان شده است. چگالی جریان نیز متاثر از دهانه ماشین کاری، ولتاژ ماشین کاری و قابلیت هدایت الکتریکی الکترولیت است. نتایج آنها نشان داد که چگالی جریان کم سبب انحلال غیر یکنواخت در این سوپرآلیاژ شده و در نتیجه سطوح با زبری سطح بالا ایجاد می شود. برای دستیابی به انحلال الکتروشیمیایی یکنواخت باید چگالی جریان بالا ایجاد کرد که در این تحقیق در چگالی جریان بالا نرخ براده برداری بالا و زبری سطح

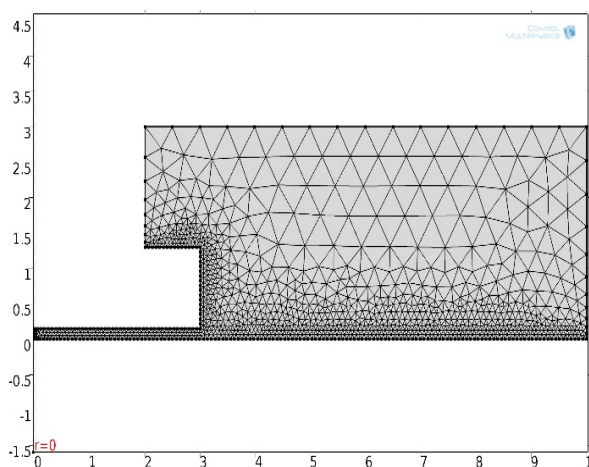
در راستای محور Z اعمال می‌شود. برای ایجاد مش بر روی هندسه از المان مثلثی استفاده شده است. تعداد المان‌ها برابر با ۲۱۳۹ در لحظه صفر ثانیه است (نمودار ۲). همچنین ماکزیمم سائز المان برابر با ۵/۰ میلی‌متر است. همگرایی المان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و از تعداد ۴۴۲ المان شبیه‌سازی اجرا و مرز قطعه‌کار به‌دست آمده که نهایت در تعداد ۲۱۳۹ المان استقلال از شبکه‌بندی تعیین شده که در نمودار ۳ نمایش داده شده است. مدل به‌عنوان یک متغیر وابسته به زمان برای مدت ۳۰ ثانیه حل شده است. نمودار ۴ نشان‌دهنده توزیع پتانسیل الکتریکی و نمودار ۵ توزیع جریان الکتریکی در محدوده ماشین‌کاری را نشان می‌دهد. بعد از حل مدل چگونگی تغییر شکل مرز قطعه‌کار مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییرات شکل مرز قطعه‌کار در زمان‌های مختلف در نمودار ۶ نشان داده شده است.



نمودار ۱) شرایط مرزی در هندسه مورد استفاده برای آنالیز

جدول ۲) شرایط مرزی برای مدل‌سازی

شرایط در نظر گرفته شده	اندازه (میلی‌متر)
مرز قطعه‌کار (ولتاژ ۲۵ ولت)	۱
گرادیان پتانسیل صفر است	۲-۴
مرز ابزار (پتانسیل صفر ولت)	۵-۷



نمودار ۲) مش‌بندی مدل

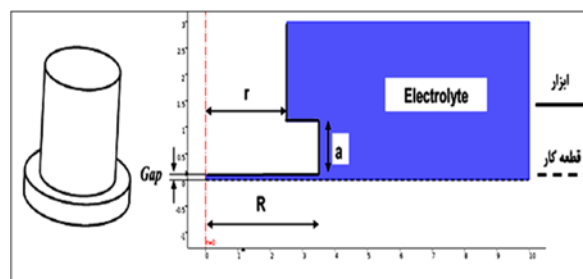
هنگامی که پتانسیل در دهانه ماشین‌کاری برقرار می‌شود، جریانی ایجاد شده و ماشین‌کاری صورت می‌گیرد. جریان ایجاد شده را می‌توان به کمک قانون اهم در این فرآیند توصیف نمود [15]:

$$i = -k \nabla \varphi \quad (3)$$

در رابطه بالا i چگالی جریان و k قابلیت هدایت الکتریکی الکترولیت است. با توجه به قانون فارادی که در بالا به آن اشاره شد، چگالی جریان پارامتر موثر در براده‌برداری است و با محاسبه آن می‌توان نرخ براده‌برداری را محاسبه نمود.

مدل‌سازی دوبعدی متقارن فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی

در این قسمت هدف ایجاد مدل، شرایط و شبیه‌سازی ماشین‌کاری الکتروشیمیایی در نرم‌افزار کامسول است. برای ساده‌سازی مدل و پایین‌آوردن زمان حل در نرم‌افزار و با توجه به اینکه ابزار متقارن است، از یک مدل دوبعدی متقارن برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مشخصات هندسه ابزار و قطعه‌کار و همچنین ابعاد هندسی آن در جدول ۱ آورده شده است.



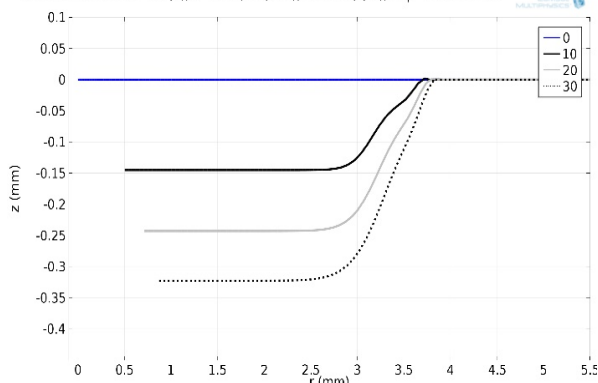
شکل ۱) هندسه دهانه ماشین‌کاری مورد استفاده برای آنالیز دوبعدی متقارن فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی

جدول ۱) هندسی مورد استفاده برای مدل‌سازی

پارامتر	اندازه (میلی‌متر)
R	۲
R	۳
A	۱/۷
Gap	۰/۱۵

فیزیک فرآیند برای مدل‌سازی ماشین‌کاری الکتروشیمیایی به‌صورت زیر تعریف می‌شود. در ابتدا برای تعریف‌نمودن الکترولیت، مقدار ۸/۸۸ زیمنس بر متر را برای هدایت الکتریکی (بر مبنای الکترولیت نیترات سدیم با غلظت ۸۰ گرم در لیتر) به آن اختصاص داده شده است. سپس شرایط مرزی برای فیزیک فرآیند برای مدل هندسی مطابق نمودار ۱ (که در جدول ۲ با جزییات آمده است) در نظر گرفته شده است.

برای تعریف پیش‌روی ابزار به سمت قطعه‌کار برای مرز ۷، عدد ۲- میکرومتر بر ثانیه انتخاب شده است. همچنین برای ایجاد قیده‌های هندسی، برای مرزهای ۲، ۴، ۶ و ۸ محدودیت جابه‌جایی



نمودار ۶) پیش‌بینی تغییر شکل مرز قطعه کار با گذشت زمان

مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش

جهت انجام آزمون عملی و تدوین تکنولوژی براده‌برداری الکتروشیمیایی، نیاز به دستگاه ماشین کاری الکتروشیمیایی با قابلیت انعطاف‌پذیری و تکرارپذیری بالا و مناسب برای انجام آزمایش‌ها است. دستگاهی با ولتاژ ۳۰ ولت و جریان ۸۰ آمپر که توانایی براده‌برداری به صورت حالت جریان مستقیم و پالسی را دارد، مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه شامل چهار واحد مجزا است که با یکدیگر با یکپارچگی خاصی در تعامل هستند. این چهار قسمت شامل واحد ماشین، واحد منبع تغذیه، واحد الکترولیت و واحد کنترل هستند. ساخت دستگاه ذکر شده، با در نظر گرفتن واحدهای اندازه‌گیری و پایش مناسب جهت انجام آزمایش‌ها و در نهایت کسب دانش فنی جهت براده‌برداری الکتروشیمیایی است. در شکل ۲ تصویری از این دستگاه نشان داده شده است.



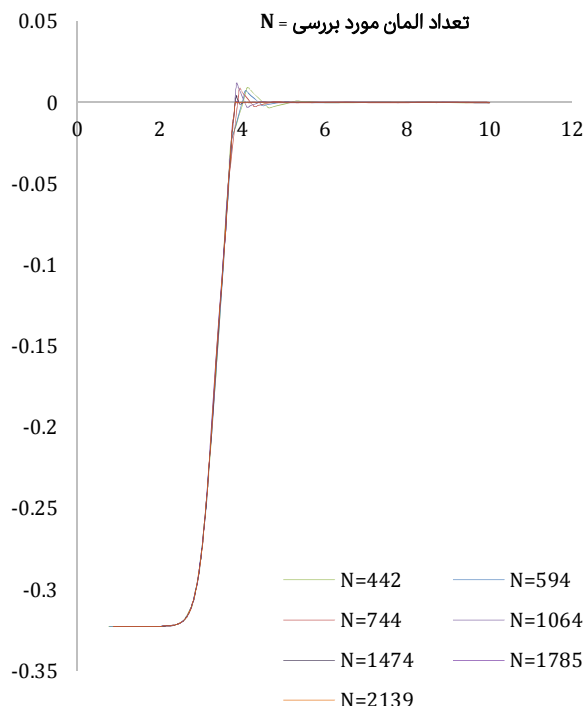
شکل ۲) دستگاه ماشین کاری الکتروشیمیایی

قطعه کار، الکترولیت، ساخت ابزار و فیکسچرهای مورد نیاز

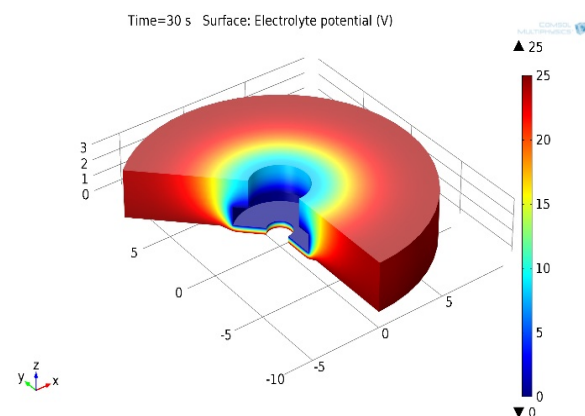
جنس قطعه کار از سوپرآلیاژ تک کریستال پایه نیکل است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۳ ارائه شده است. آلیاژهای پایه نیکل از جمله موادی هستند که علاوه بر کاربرد فراوان در صنایع هوایی و پزشکی و غیره سختی و استحکام بالایی دارند و ماشین کاری آنها به کمک روش‌های سنتی و مدرن دیگر دچار چالش‌هایی از جمله سایش در ابزار، ایجاد تنش‌های حرارتی و

مرز قطعه کار با تغییر تعداد المان

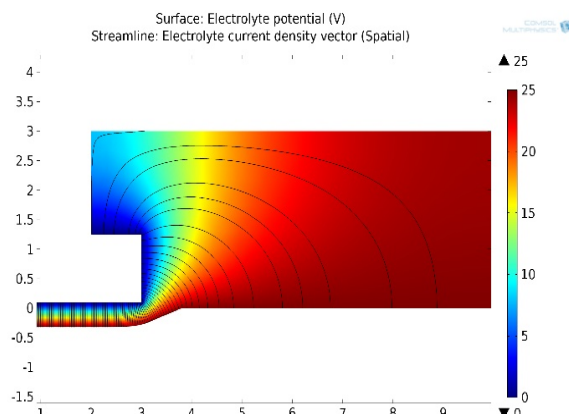
N = تعداد المان مورد بررسی



نمودار ۳) آنالیز حساسیت نسبت به تعداد المان‌ها



نمودار ۴) توزیع پتانسیل در محدوده ماشین کاری در زمان ۳۰ ثانیه



نمودار ۵) توزیع جریان الکتریکی در محدوده ماشین کاری در زمان ۳۰ ثانیه

داخل ابزار) وجود دارد. محل قرارگیری قطعه کار و مکان انجام ماشین کاری الکتروشیمیایی در این محفظه انجام خواهد گرفت. از آنجایی که این دستگاه کاربرد آزمایشگاهی دارد و هدف از آن تدوین پارامترهای ماشین کاری الکتروشیمیایی است، ساخت این محفظه که فرآیند براده برداری در آن انجام می شود از اهمیت به سزایی برخوردار است. جنس این محفظه از پلکسی گلاس انتخاب شده است که هم عایق جریان الکتریکی و هم در مقابل مواد شیمیایی مقاوم است. شفاف بودن پلکسی گلاس علاوه بر زیبایی و قابل رویت بودن داخل محفظه باعث بررسی بهتر فرآیند می شود.

ابزار با جنس برنج قطر ۶ میلی متر بوده و نوک آن باید پولیش و سنگ زنی شود که هر گونه آثار تراشکاری برطرف شود و سطحی صاف و صیقلی ایجاد شود. مکانیزم ابزارگیر دستگاه وظیفه نگهداری ابزار را در این دستگاه دارد. راحتی در تعویض ابزار، انتقال الکترولیت از داخل ابزار جهت شست و شو و حرکت الکترولیت از دهانه ماشین کاری و عدم انتقال جریان الکتریکی به قسمت های دیگر دستگاه در طراحی و ساخت ابزار مهم است. از محاسن این فرآیند همان طور که در قسمت های قبلی اشاره شد، عدم سایش در ابزار است، به گونه ای که با یک ابزار تعداد زیادی قطعه کار ماشین کاری می شود. برای جلوگیری از تاثیر منفی جریان های سرگردان در اطراف ابزار، کناره آن عایق شده است. از شیرینگ حرارتی (روکش حرارتی) یا روکش های حرارتی جمع شونده برای عایق کردن ابزار استفاده شده است. این روکش ها علاوه بر عایق کاری، در برابر فرسودگی و مواد شیمیایی نیز مقاومت ایجاد می کنند. محفظه کاری و نحوه اتصال قطب منفی به ابزار و قطب مثبت به قطعه کار در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین ابزار در فاصله ای که به دهانه ماشین کاری شناخته می شود در مقابل قطعه کار در این محفظه کاری قرار می گیرد.

در نهایت بعد از تنظیم پارامترهای ورودی فرآیند مانند ولتاژ، پیشروی ابزار، جریان الکترولیت، دهانه ماشین کاری اولیه، میزان برگشت ابزار برای شست و شو و زمان ماشین کاری، براده برداری روی قطعه کار صورت پذیرفته است.



شکل ۴) ابزار و قطعه کار در محفظه کاری

مکانیکی، ایجاد منطقه متاثر از حرارت و دقت و کیفیت سطح نامطلوب است. قطعه کار به قطر ۱۹ میلی متر از این ابزار خاص است، که در شکل ۳ نشان داده شده است. ضخامت قطعه کار ۲ میلی متر بوده که به کمک روش وایرکات برش داده و سپس سنگ زده شده است. هر قطعه کار به کمک فیکسچری که طراحی و ساخته شده است، در محفظه کاری قرار گرفته و ارتباط به منبع تغذیه به کمک پیچ به این فیکسچر است.

جدول ۳) ترکیب شیمیایی قطعه کار CMSX-4

ترکیبات	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
Ni	بقیه	بقیه
Co	۹/۳	۱۰
Cr	۶/۴	۶/۶
Ta	۶/۳	۶/۷
W	۶/۲	۶/۶
Al	۵/۴۵	۵/۷۵
Re	۲/۸	۳/۱
Ti	۰/۹	۱/۱
Mo	۰/۵	۰/۷
Hf	۰/۰۷	۰/۱۲
Nb	-	۰/۱
C	-	۰/۰۸
Si	-	۰/۰۴
Mn	-	۰/۰۱
V	-	۰/۰۱
P	-	۰/۰۱۵
Fe	-	۰/۰۱۵
Cu	-	۰/۰۰۵



شکل ۳) قرص های تهیه شده از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل

یکی از عوامل اصلی در ماشین کاری الکتروشیمیایی، الکترولیت است. یکنواخت و خالص بودن الکترولیت در طول پروسه ماشین کاری از اهمیت بالایی برخوردار است. فلزات برداشته شده از قطعه و به طور کلی ناخالصی های موجود در الکترولیت علاوه بر تغییر نرخ براده برداری، احتمال خطر جرقه را افزایش می دهد که باید سیستم تصفیه و فیلتراسیون مناسبی در دستگاه در نظر گرفته شود. الکترولیت مورد استفاده محلول نیترات سدیم با غلظت ۸۰ گرم در لیتر و قابلیت هدایت الکتریکی ۸/۸۸ زیمنس بر متر با توجه به شبیه سازی عددی است.

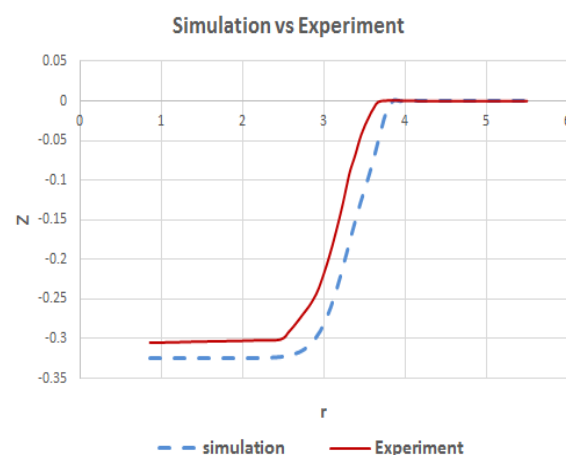
در این دستگاه امکان حرکت الکترولیت موازی با سطح قطعه کار (از دیوارهای جانبی محفظه کاری) و یا عمود بر سطح قطعه کار (از

بررسی عددی و تجربی ماشین کاری الکتروشیمیایی سوپرآلیاژ تک کریستال پایه نیکل ۱۸۷۹
شبیه سازی برابر ۳۲۵۴/۰ و در آزمون عملی برابر ۳۰۰۹/۰ میلی متر
است. از رابطه زیر برای محاسبه خطا استفاده شده است.

$$\text{خطا} = \frac{0.3254 - 0.3009}{0.3009} = 0.08 \quad (۴)$$

اختلاف جابه جایی مرز قطعه کار در آزمون عملی و شبیه سازی
جابه جایی مرز قطعه کار آزمون عملی

خطای حدود ۸٪ بین نتایج حاصل از شبیه سازی و اعتبارسنجی
عملی حکایت از امکان سنجی براده برداری الکتروشیمیایی و
عملکرد مناسب فرآیند دارد.



نمودار (۷) مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و آزمون عملی

در ادامه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای مقایسه
میکروساختار قبل و بعد از ماشین کاری الکتروشیمیایی ارائه شده
است. ذرات درشت و سفید رنگ موجود در این تصاویر فازهای
کاربید هستند که به صورت ناهمگن پراکنده شده اند. قسمت های
سیاه نشان دهنده فاز استحکام بخش گاما پرایم (Y') و فاز زمینه
سفید گاما (Y) است که به صورت فازهای گاما زمینه و گاما پرایم
مکعبی در زمینه مشاهده شده اند. شکل ۶ تصویر میکروسکوپ
الکترونی روبشی نمونه سوپرآلیاژ تک کریستال CMSX-4 قبل از
ماشین کاری الکتروشیمیایی را نشان می دهد. در این تصویر
مشخص است که نمونه عاری از مرز دانه است و فازهای مکعبی
گاما پرایم به صورت همگن در فواصل بسیار کوتاه از یکدیگر در
داخل فاز زمینه گاما توزیع شده اند. تصویر میکروسکوپ الکترونی
رویشی بعد از ماشین کاری الکتروشیمیایی در شکل ۷ نشان داده
شده است. با مقایسه شکل های ۶ و ۷، ماشین کاری
الکتروشیمیایی تاثیری بر روی میکروساختار نمی گذارد و نمونه
همچنان به صورت تک کریستال با فازهای گاما پرایم توزیع شده در
زمینه گاما است.

نتایج

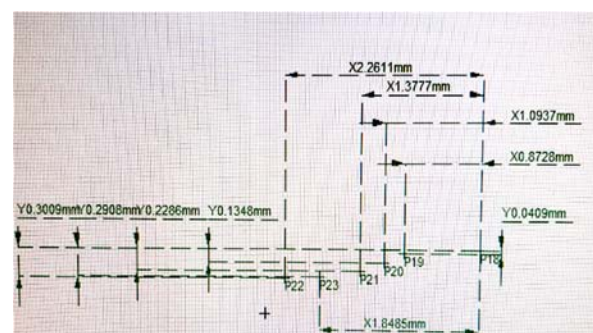
آزمایش ها بر روی قطعه کار با قطر ۱۵ میلی متر انجام شده است و
با اجرای آزمون عملی، امکان سنجی و پیاده سازی عملی
براده برداری الکتروشیمیایی ماده مد نظر مورد بررسی قرار گرفته
است. پارامترهای دستگاه با توجه به شرایط شبیه سازی در جدول
۴ تنظیم شده است.

جدول (۴) تنظیمات دستگاه و پارامترهای ماشین کاری

پارامتر	مقادیر
ولتاژ	۲۵ ولت
دهانه ماشین کاری	۱۵۰ میکرون
پیش روی ابزار	۲ میکرومتر بر ثانیه
غلظت الکترولیت	۸۰ گرم در لیتر
هدایت الکتریکی الکترولیت	۸/۸۸ زیمنس بر متر
زمان ماشین کاری	۳۰ ثانیه

نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی در کامسول نشان دهنده
توانایی براده برداری الکتروشیمیایی است. با توجه به اینکه
پارامترها و شرایط مختلفی در این فرآیند مدرن دخیل است و از
طرف دیگر ماده مورد نظر، خاص و جدید و به صورت تک کریستال
است، اجرای عملی و بررسی امکان پذیری براده برداری
الکتروشیمیایی از اهمیت ویژه ای برخوردار است که با موفقیت
انجام پذیرفت.

شکل ۵ به کمک دستگاه VMM (دستگاه اندازه گیری ویدیویی)
جهت اندازه گیری و رسم نحوه جابه جایی قطعه کار در اثر آزمون،
تهیه شده است. بعد از ماشین کاری الکتروشیمیایی به مدت
۳۰ ثانیه، قطعه کار به کمک وایرکات از وسط برش داده شده است و
تصویر از دید به پهنای قسمت برش داده شده برای تعیین میزان
براده برداری ترسیم شده است.



شکل (۵) اندازه گیری انجام شده برای تعیین مرز قطعه کار با VMM

در نمودار ۷ مقایسه بین مرز قطعه کار ماشین کاری شده به کمک
شبیه سازی عددی و آزمون عملی صورت پذیرفته است. نحوه
محاسبه خطا با در نظر گرفتن میزان پیش روی مرز قطعه کار در
پایان فرآیند براده برداری است. حداکثر جابه جایی قطعه کار در

آزمون عملی، توانایی فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی در براده‌برداری سوپرآلیاژ تک‌کریستال CMSX-4 را نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

تاییدیه اخلاقی: تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی و چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است.

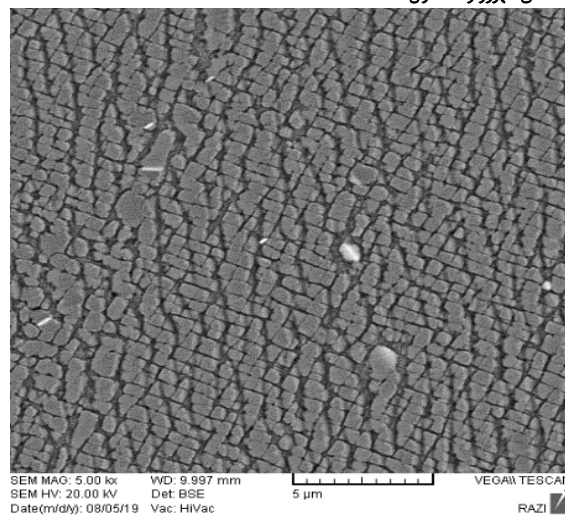
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: علی مهرور (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ علیرضا میرک (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ محمدرضا رضایی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۰٪).

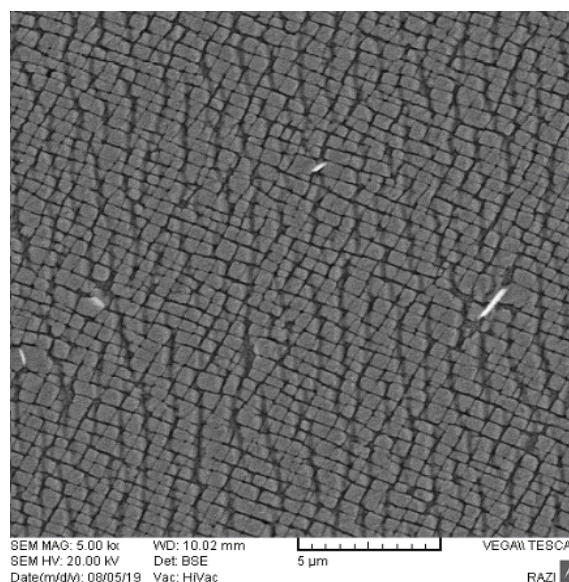
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- 1- McGeough JA. Principles of Electrochemical Machining. London: Chapman & Hall; 1974.
- 2- Davydov AD, Volgin VM, Lyubimov VV. Electrochemical machining of metals: Fundamentals of electrochemical shaping. Russian Journal of Electrochemistry. 2004;40:1230-1265.
- 3- Mehrvar A, Basti A, Jamali A. Modeling and parameter optimization in electrochemical machining process: Application of dual response surface desirability approach. Latin American Applied Research. 2017;47(4):157-162.
- 4- Mirak AR, Kermanpour A, Asgari M, Soltannejad M. Effect of solidification process of single crystal on the microstructure and tensile properties of Ni-base superalloy CMSX-4. 8th International Conference on Material Engineering and Metallurgy, 7-8 October 2019, Tehran, Iran. Hamedan: Hamedan University of Technology; 2019. [Persian]
- 5- Mehrvar A, Basti A, Jamali A. Optimization of electrochemical machining process parameters: Combining response surface methodology and differential evolution algorithm. Journal of Process Mechanical Engineering. 2017;231(6):1114-1126.
- 6- Klockea F, Zeisa M, Klinka A, Veselovaca D. Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components. Procedia CIRP. 2013;6:368-372.
- 7- Niu S, Qu N, Fu Sh, Fang X, Li H. Investigation of inner-jet electrochemical milling of nickel-based alloy GH4169/Inconel 718. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;93:2123-2132.
- 8- Xu Z, Sun L, Hu Y, Zhang J. Flow field design and experimental investigation of electrochemical machining on blisk cascade passage. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014;71:459-469.
- 9- Ge Y, Zhu Z, Wang D. Electrochemical dissolution behavior of the nickel-based cast superalloy K423A in NaNO₃ solution. Electrochimica Acta. 2017;253:379-389.
- 10- Bilgi DS, Jain VK, Shekhar R, Mehrotra Sh. Electrochemical deep hole drilling in super alloy for turbine application. Journal of Materials Processing Technology. 2004;149(1-3):445-452.
- 11- Huang SF, Liu Y. Electrochemical micromachining of complex shapes on nickel and nickel-based superalloys.



شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل از ماشین‌کاری الکتروشیمیایی



شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از ماشین‌کاری الکتروشیمیایی

نتیجه‌گیری

بررسی عددی فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی بر روی سوپرآلیاژ تک‌کریستال پایه نیکل نشان از امکان‌پذیری و سرعت مناسب نرخ براده‌برداری برای این ماده که مشکلات اساسی در ماشین‌کاری آن با روش‌های سنتی و یا مدرن دیگر دارد، می‌دهد. با توجه به اینکه این فرآیند در عمل با پارامترها و شرایط پیچیده‌ای همراه است، بررسی عملی و پیاده‌سازی این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در آزمون عملی برای توانایی این روش در براده‌برداری سوپرآلیاژ خاص پایه نیکل مشاهده شد. از آنجایی که فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی به‌صورت انحلال الکتروشیمیایی بوده و فرآیندی سرد و بدون تماس بین ابزار و قطعه‌کار است، از این‌رو این قطعه‌کار با شرایط مناسب‌تری ایجاد خواهد شد. همچنین خطای حدود ۸٪ در اعتبارسنجی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و

approach. Materials and Manufacturing Processes. 2015;30(7):842-851.

14- Zhu D, Yu L, Zhang R. Dissolution effects with different microstructures of inconel 718 on surface integrity in electrochemical machining. Journal of the Electrochemical Society. 2018;165(16):872-878.

15- Kozak J. Computer simulation system for electrochemical shaping. Journal of Materials Processing Technology. 2011;109(3):354-359.

Materials and Manufacturing Processes. 2015;29(11-12):1483-1487.

12- Burger M, Koll L, Werner EA, Platz A. Electrochemical machining characteristics and resulting surface quality of the nickel-base single-crystalline material LEK94. Journal of Manufacturing Processes. 2012;14(1):62-70.

13- Singh A, Anandita S, Gangopadhyay S. Microstructural analysis and multi response optimization during ECM of inconel 825 using hybrid