



بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر زبری سطح و عمق باربرداری در فرایند ماشین کاری شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V

ولی علی میرزالو^{۱*}، وحید مدانلو^۲، میثم هادوی فر^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

* ارومیه، صندوق پستی ۱۶۵-۵۷۱۵۳، v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

چکیده

برای باربرداری و حذف لایه آلفای سطحی در آلیاژ تیتانیوم، از ماشینکاری شیمیایی به عنوان یک عملیات تکمیلی استفاده می‌شود. در این عملیات، عمق باربرداری و زبری سطح از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند که از پارامترهای ماشین کاری شامل دما، زمان عملیات و درصد اسیدهای محلول شیمیایی تاثیر می‌پذیرند. در این مقاله ابتدا با طراحی و انجام آزمایش‌های تجربی، اثرات اصلی و متقابل پارامترهای موثر در ماشین کاری شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V با محلول شیمیایی HF و HNO₃ بررسی می‌شود. سپس با استفاده از روش روی هم قراردادن نمودارهای کانتوری، محدوده مناسب پارامترهای ماشین کاری برای زبری سطح و عمق باربرداری مطلوب، جهت حذف لایه آلفای سطحی ایرفویل یک نوع پره فورج شده استخراج می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که عمق باربرداری با افزایش دما، مدت زمان و درصد HF افزایش می‌یابد، اما با افزایش HNO₃ مقداری کاهش می‌یابد. تاثیر پارامترها بر زبری سطح روند یکنواختی ندارد و اکثر پارامترها در تاثیر بر عمق باربرداری و زبری سطح اثر متقابل دارند. با استفاده از روش روی هم قرار دادن نمودارهای کانتوری، برای دو نوع درصد اسیدها، محدوده مناسب دما و مدت عملیات برای حذف لایه آلفای سطحی همراه با زبری سطح مطلوب بدست آمد.

کلید واژگان: ماشین کاری شیمیایی، زبری سطح، آلیاژ Ti-6Al-4V، عمق باربرداری

Investigation of the effective parameters on the surface roughness and material removal depth in chemical machining of Ti-6Al-4V alloy

Vali Alimirzaloo*, Vahid Modanloo, Meisam Hadavifar

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

* P.O.B. 57153-165 Urmia, Iran, v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

ABSTRACT

Chemical machining is used as a finishing operation for the material removing (MR) and elimination of the alpha surface layer in titanium alloy. In this operation, MR depth and surface roughness (SR) are important and influenced by the machining parameters such as temperature, operation time and percent of chemical acids. In this paper, main and interaction effects of the effective parameters are investigated in the chemical machining of Ti-6Al-4V alloy by HF and HNO₃ chemical solutions using design and performing the experiments. Also, appropriate range of machining parameters have been determined using overlaid counter plots method that is used for elimination of the alpha surface layer of a forged airfoil blade. Results showed that the MR depth increases by increasing the temperature, time and percent of HF, but a little decreases by increasing the percent of HNO₃. Effects of the parameters on the roughness are not similar. Most of the parameters interact with each other in affecting on the MR depth and SR. For the both types of acids, appropriate ranges of temperature and operation time were obtained for eliminating the alpha surface layer and the desired roughness.

Keywords: Chemical Machining, Material Removal Depth, Surface Roughness, Ti-6Al-4V Alloy.

زمینه در دهه اخیر می‌توان به کار تاکاهاشی و همکارانش در سال ۲۰۰۲

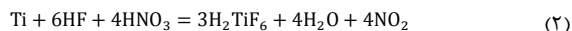
اشاره کرد که در فرایند ماشین کاری شیمیایی سطحی یا اسیدشویی قطعه تیتانیومی، تاثیر اندازه دانه‌بندی اولیه را در برآقی و سفیدی سطح بررسی کرده‌اند. مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که کاهش اندازه دانه‌ها منجر به کاهش برآقی سطح می‌شود [۲]. بان و همکارانش در سال ۲۰۰۶، تاثیر اسید سولفوریک را در عملیات حکاکی بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دما و مدت عملیات، صافی سطح کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش دما بعد از یک فاصله زمانی اولیه، عمق باربرداری افزایش می‌یابد [۳]. هو و همکارانش در سال ۲۰۰۸ ماشین کاری شیمیایی نیکل نانو کریسالیزه شده را بررسی کردند و با ترکیب اسید سولفوریک و HNO₃، از ایجاد ترک بر

۱- مقدمه

فرایند ماشین کاری شیمیایی، در زمره فرایندهای ماشین کاری غیرسنتی قرار می‌گیرد که در آن از انرژی شیمیایی برای جدا کردن قسمتی از مواد استفاده می‌شود. در این روش هیچ‌گونه تنش مکانیکی و حرارتی بر قطعه کار اعمال نمی‌شود و کلیه خصوصیات مواد قطعه در عمق‌های مختلف بدون تغییر باقی می‌ماند. این فرایند قدمتی بیش از چندین قرن دارد که کاربرد آن از ساخت تراشه‌های کوچک الکترونیکی تا سازه‌های غول‌پیکری همچون بدنه فضاپیماها گسترده شده است. از اولین کاربردهای صنعتی این روش، به‌کارگیری آن در تولید بدنه هواپیما می‌باشد که در سال ۱۹۵۳ جهت کاهش وزن بدنه هواپیما و عملیات نقش‌اندازی، استفاده می‌شد [۱]. از مطالعات انجام شده در این

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

V. Alimirzaloo, V. Modanloo, M. Hadavifar, Investigation of the effective parameters on the surface roughness and material removal depth in chemical machining of Ti-6Al-4V alloy, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 410-415, 2015. (in Persian فارسی)



به علت گرمازا بودن این واکنش دمای محلول افزایش یافته و افزایش دما بر سرعت واکنش تاثیر می‌گذارد. آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مخلوطی از دو فاز آلفا (hcp) و فاز بتا (bcc) است. فاز آلفا که سخت فورج می‌شود معمولاً در دماهای پایین وجود دارد و فاز بتا که خیلی آسان فورج می‌شود در دماهای بالا وجود دارد. با افزایش دما از میزان فاز آلفا کاسته شده و بر مقدار فاز بتا افزوده می‌شود. در اثر فورج داغ آلیاژ تیتانیوم و خنک شدن سریع قطعه یک لایه غنی از فاز آلفا در سطح قطعه بوجود می‌آید. این لایه که به نام لایه آلفای سطحی نامیده می‌شود، ترد بوده و منبع تشکیل و رشد ترک‌های ریز و در نتیجه کاهش عمر قطعه کار می‌شود. بنابراین استفاده از عملیات تکمیلی مانند ماشین کاری شیمیایی برای حذف این لایه از سطح قطعه ضروری است. مطالعات قبلی توسط مولف اول [۶] نشان می‌دهد که حداکثر ضخامت این لایه در فورج داغ پره کمپرسور موتورهای توربینی حدود ۱۵۰ میکرون است. در عملیات ماشین کاری شیمیایی، ریز ساختار سطح قطعه در معرض واکنش شیمیایی قرار گرفته و حل می‌شود. در یک نگاه میکروسکوپی به دلیل بالاتر بودن سطح انرژی مرزدهانه نسبت به دانه‌های سطح سرعت واکنش شیمیایی در نقاط مختلف سطح متفاوت می‌باشد. همچنین اختلاف فواصل اتمی باعث سرعت خوردگی متفاوت می‌شود [۱۱]. اختلاف سرعت خوردگی در نقاط مختلف سطح منجر به تغییر زبری سطح قطعه می‌شود. در کاربردهای صنعتی خصوصاً در صنایع هوایی، علاوه بر حذف لایه آلفای سطحی، کیفیت سطح نهایی به ویژه صافی سطح قطعه بسیار مهم است. زیرا خواص استحکامی قطعه از صافی سطح آن تاثیر می‌پذیرد. بنابراین در این تحقیق ضمن بررسی تاثیر پارامترهای ماشین کاری بر عمق باربرداری و زبری سطح، محدوده مناسب پارامترها برای حذف کامل لایه آلفای سطحی و زبری سطح مطلوب استخراج می‌شود.

۳- طراحی و انجام آزمایش‌ها

مطالعه کارهای قبلی در مورد تاثیر پارامترهای موثر در فرایند ماشین کاری شیمیایی آلیاژ Ti6Al4V نشان می‌دهد که پارامترهای دما، غلظت اسیدها و مدت زمان ماشین کاری در کیفیت سطح نهایی قطعه و عمق بار برداری می‌توانند تاثیر گذار باشند. بنابراین با طراحی و انجام آزمایش‌های لازم تاثیر پارامترها بررسی شد. برای طراحی آزمایش‌ها از روش تاگوچی و برای هر فاکتور سه سطح لحاظ شد. محدوده و سطوح پارامترها براساس مطالعات قبلی و تجربیات موجود به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شد. با توجه به تعداد فاکتورها و سطوح آن‌ها، آرایه L27 به عنوان آرایه استاندارد برای طراحی آزمایش‌ها انتخاب شد و مطابق این آرایه، ۲۷ آزمایش مطابق جدول ۲ طراحی شد [۱۳، ۱۲]. نمونه‌های آزمایش به صورت استوانه‌ای شکل به قطر ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر مطابق شکل ۱ تهیه شدند و در کوره‌ای با درجه حرارت ۸۸۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شدند سپس در هوا خنک شدند تا لایه آلفای سطحی روی نمونه‌ها ایجاد شود. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌ها طبق شرایط هر آزمایش در جدول طراحی آزمایش‌ها به روش غوطه وری اجرا شد. محلول اولیه اسیدها از HF با غلظت ۷۰٪ و HNO3 با غلظت ۵۵٪ تشکیل شده بود. با توجه به گرمازا بودن فرایند شیمیایی در برخی از آزمایش‌ها، دما به حدی بالا می‌رود که کنترل آن به شدت مشکل می‌شود. بدین منظور از دستگاه حمام آب ۲۱۱ لیتری مدل ۱۰۰۴ ساخت شرکت GFL استفاده شد و از ترمومتر لیزری دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ برای اندازه گیری دما در حین عملیات استفاده شد. با انجام عملیات

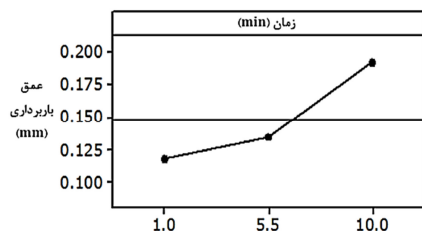
روی سطح قطعه جلوگیری کرده‌اند [۴]. هادوی فر و همکارانش [۵] در سال ۲۰۱۴ نرخ خوردگی را در فرایند اسیدشویی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با استفاده از روش تاگوچی بررسی کرده‌اند و مقادیر بهینه پارامترهای ماشین کاری را بدست آورده‌اند. از ماشین کاری شیمیایی گاهی به عنوان یک فرایند تکمیلی بعد از عملیات‌های شکل‌دهی فلزات استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای این فرایند، در اسیدشویی با ماشین کاری شیمیایی سطحی قطعات فورج داغ شده مانند پره‌های تیتانیومی می‌باشد. از آنجا که در اثر فورج داغ این گونه قطعات، لایه ترد سطحی به نام لایه آلفا بوجود می‌آید که استحکام خستگی قطعه را کاهش می‌دهد، لازم است بعد از فورج از سطح قطعه باربرداری شود [۶]. سای و تسای در سال ۲۰۰۴ اسیدشویی آلیاژ Ti6Al4V را برای حذف لایه آلفای سطحی مطالعه کردند. بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که نسبت محلول‌های HF و HNO3 تاثیر زیادی در برداشتن لایه آلفا دارد [۷]. روسو و موتوبو در سال ۲۰۱۱ تاثیر محلول شیمیایی را در اسیدشویی لایه آلفا در آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با نسبت بهینه اسیدهای HF و HNO3، لایه آلفا به اندازه کافی برداشته می‌شود و نسبت اسیدها، تاثیر زیادی در زمان و دمای فرایند دارد. در این تحقیق برای کاهش تاثیر منفی اسیدها بر روی سطح قطعه، از اسید فسفریک استفاده شده است [۸]. علی میرزالی و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۵ فرایند ماشین کاری شیمیایی ایرفویل یک نوع پره فورج شده از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V را جهت حذف لایه آلفای سطحی بررسی کرده‌اند. در این مطالعه آن‌ها توانسته‌اند با استفاده از محلول شیمیایی اسید نیتریک و اسید فلوریک لایه آلفا را به طور یکنواخت در سطح مقطع ایرفویل باربرداری کنند. در زمینه ماشین کاری شیمیایی سطحی آلیاژ تیتانیوم و باربرداری لایه آلفا، مطالعات موجود غالباً به بررسی تاثیر نسبت اسیدها بر عمق باربرداری و حذف لایه آلفا پرداخته‌اند. در این مقاله علاوه بر درصد اسیدها تاثیر دما و مدت زمان عملیات بر عمق باربرداری و زبری سطح پرداخته می‌شود. همچنین علاوه بر اثرات اصلی، اثر متقابل این پارامترها بررسی می‌شود. سپس با استفاده از روش روی هم قراردادن نمودارهای کانتوری، مقادیر مناسب پارامترهای ماشین کاری برای زبری سطح و عمق باربرداری مطلوب جهت حذف لایه آلفای سطحی ایرفویل یک نوع پره فورج شده از جنس آلیاژ Ti6Al4V استخراج می‌شود.

۲- ماشین کاری شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V

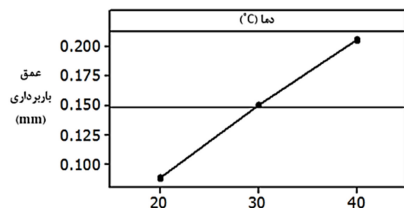
ماشین کاری شیمیایی با توجه به عمق و سطح باربرداری شده، به شکل‌های مختلف مانند باربرداری سطحی یا اسیدشویی یکنواخت، سوراخ کاری و کانتور تراشی انجام می‌شود. محلول‌های اسیدشویی اغلب محیط‌های اسیدی یا بازی هستند که بر سطح قطعه، براساس واکنش شیمیایی، اثر کرده و قسمت مورد نظر را در خود حل می‌کنند. جنس، دما، غلظت و چگونگی تماس با قطعه از عوامل کنترل کننده واکنش شیمیایی هستند. انرژی اصلی اسیدشویی که همان اعمال انرژی شیمیایی برای حل کردن مواد می‌باشد در اثر واکنش شیمیایی تأمین می‌گردد. برای ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم معمولاً از محلول HNO3 و HF استفاده می‌شود. در صورتی که از HF بدون HNO3 استفاده شود، HF با عنصر تیتانیوم موجود در قطعه بدین صورت واکنش می‌دهد.



در صورتی که هیدروژن حاصل از این واکنش در فلز پایه جذب شود باعث کاهش مقاومت به شکست می‌شود. بدین منظور از محلول HNO3 و HF برای ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم استفاده می‌شود [۷]. در این حالت واکنش شیمیایی به صورت رابطه (۲) روی می‌دهد [۱۰].



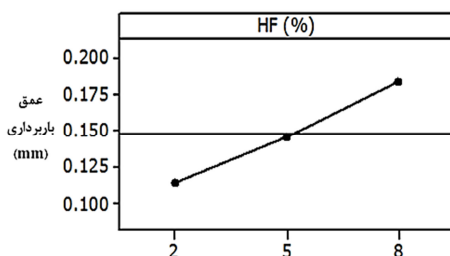
شکل ۲ تاثیر مدت زمان عملیات بر عمق باربرداری



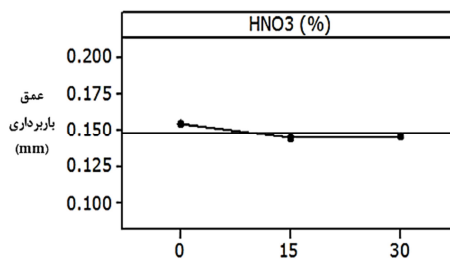
شکل ۳ تاثیر دمای عملیات بر عمق باربرداری

بیشتر می شود. علت این افزایش می تواند افزایش دمای محلول با افزایش زمان است که ناشی از گرما زا بودن واکنش می باشد. تاثیر دمای عملیات بر عمق باربرداری در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش دما هم عمق باربرداری افزایش می یابد، یعنی نرخ خوردگی با افزایش دما بیشتر می شود. این پدیده هم مربوط به ماهیت واکنش شیمیایی است که در اثر افزایش دما تسریع می شود.

در شکل های ۴ و ۵ به ترتیب تاثیر درصد اسیدهای HF و HNO₃ در محلول شیمیایی بر عمق باربرداری نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش غلظت HF عمق باربرداری بیشتر می شود. با توجه به واکنش شیمیایی طبق رابطه ۱ و ۲ عامل اصلی خورده شدن سطح قطعه اسید HF می باشد. بنابراین طبیعی است که با افزایش غلظت اسید، اتم های بیشتری فرصت واکنش پیدا می کنند در نتیجه نرخ خوردگی بیشتر می شود. در حالیکه مطابق شکل ۵ با افزایش درصد اسید HNO₃ عمق باربرداری نه تنها زیاد نمی شود بلکه اندکی کاهش می یابد.



شکل ۴ تاثیر درصد اسید HF در محلول شیمیایی بر عمق باربرداری

شکل ۵ تاثیر درصد اسید HNO₃ در محلول شیمیایی بر عمق باربرداری

ماشین کاری شیمیایی، عمق باربرداری با اندازه گیری ضخامت نمونه ها در قبل و بعد از عملیات برای هر آزمایش بدست آمد. زبری سطح نمونه ها توسط دستگاه زبری سنج طبق معیار زبری میانگین Ra برحسب μm اندازه گیری شد. بنابراین زبری سطح و عمق باربرداری در هر آزمایش بدست آمد. در جدول ۲ تعدادی از آزمایش ها و مقادیر خروجی نشان داده شده است.

۴- نتایج و بحث

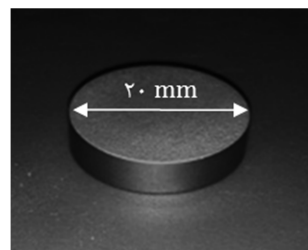
با اجرای آزمایش ها و استخراج مقادیر خروجی برای هر آزمایش، تاثیرات اصلی و متقابل پارامترهای ماشین کاری (دما، غلظت اسیدها و مدت زمان) بر عمق باربرداری و زبری سطح بررسی و محدوده مناسب پارامترها استخراج گردید.

۴-۱- تاثیر پارامترها بر عمق باربرداری

۴-۱-۱- تاثیرات اصلی

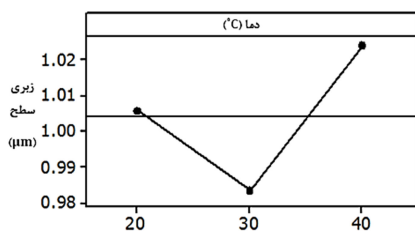
در شکل ۲ تاثیر مدت زمان عملیات بر عمق باربرداری نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش زمان از ۱ دقیقه به ۵/۵ دقیقه عمق باربرداری مقداری افزایش می یابد و با افزایش زمان تا ۱۰ دقیقه عمق باربرداری با سرعت بیشتری افزایش می یابد. به بیان دیگر نرخ باربرداری با افزایش زمان

جدول ۱ دامنه و سطوح پارامترها			
پارامتر	سطوح		
	کم	متوسط	زیاد
دما (°C)	۲۰	۳۰	۴۰
زمان (min)	۱	۵/۵	۱۰
HF (%)	۲	۵	۸
HNO ₃ (%)	۰	۱۵	۳۰

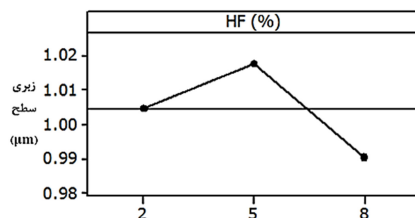


شکل ۱ نمونه آزمایش

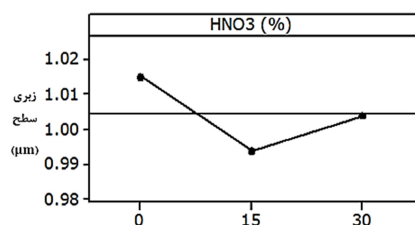
جدول ۲ تعدادی از آزمایش ها و مقادیر خروجی						
شماره آزمایش	HNO ₃ (%)	HF (%)	زمان (min)	دما (°C)	زبری سطح باربرداری (μm)	عمق باربرداری (mm)
۱	۰	۲	۲۰	۱	۰/۹۶	۰/۰۳
۲	۱۵	۵	۲۰	۱	۱	۰/۰۶
۳	۳۰	۸	۲۰	۱	۰/۹۶	۰/۰۸
۴	۱۵	۲	۳۰	۱	۱/۰۱	۰/۰۶
۵	۳۰	۵	۳۰	۱	۱	۰/۰۸
۶	۰	۸	۳۰	۱	۰/۹۸	۰/۱۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۶	۰	۵	۴۰	۱۰	۱/۰۳	۰/۲۴
۲۷	۱۵	۸	۴۰	۱۰	۰/۹۵	۰/۲۸



شکل ۸ تاثیر دمای عملیات بر زبری سطح



شکل ۹ تاثیر درصد اسید HF در محلول شیمیایی بر زبری سطح



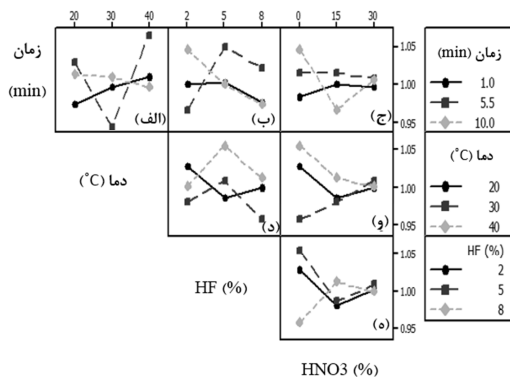
شکل ۱۰ تاثیر درصد اسید HNO3 در محلول شیمیایی بر زبری سطح

۲-۲-۴- تاثیرات متقابل

اثر متقابل پارامترهای ماشین کاری در تاثیر بر زبری سطح در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می شود همه پارامترها در تاثیر بر زبری سطح با هم اثر متقابل دارند. مثلاً در اثر متقابل دما و درصد HNO3 بر زبری سطح (شکل ۶-و) مشاهده می شود که در دمای ۳۰ درجه با افزایش درصد HNO3 زبری سطح افزایش می یابد. اما در دمای ۴۰ درجه با افزایش درصد HNO3 زبری سطح کاهش می یابد. نکته ای که در سه نمودار ۶-ج، ۶-ه و ۶-و مشاهده می شود این است که در ۳۰ درصد HNO3 با تغییر هر سه پارامتر دیگر زبری سطح تغییر چندانی نمی کند.

۳-۴- بهینه سازی فرایند با استفاده از نمودارهای کانتوری

با فرض این که عمق باربرداری بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۰ میلی متر و زبری سطح



شکل ۱۱ اثر متقابل پارامترهای ماشین کاری در تاثیر بر زبری سطح

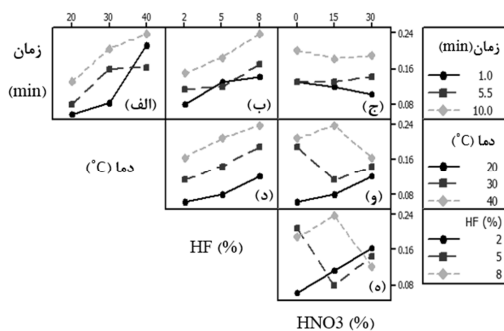
۴-۱-۲- تاثیرات متقابل

اثر متقابل پارامترهای ماشین کاری در تاثیر بر عمق باربرداری در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که مطابق شکل ۶-د درصد HF و دما با هم اثر متقابل ندارند یعنی در هر سه دمای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه با افزایش درصد HF عمق باربرداری افزایش می یابد. در حالی که مطابق شکل ۶-ه درصد HF و HNO3 با هم اثر متقابل دارند، یعنی تاثیر افزایش درصد HNO3 بر عمق باربرداری در درصدهای مختلف HF متفاوت است. به عنوان مثال در ۵ درصد HF با افزایش درصد HNO3 از ۱۵ به ۳۰ عمق باربرداری افزایش می یابد اما در ۸ درصد HF با افزایش درصد HNO3 از ۱۵ به ۳۰ عمق باربرداری کاهش می یابد. به همین ترتیب مطابق شکل های ۶-ب زمان-درصد HF و مطابق ۶-ج زمان-درصد HNO3 با هم اثر متقابل ندارند و در بقیه حالت ها یعنی ۶-الف زمان-دما و ۶-و دما-درصد HNO3 با هم اثر متقابل دارند.

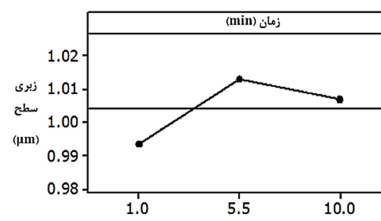
۴-۲-۲- تاثیر پارامترها بر زبری سطح

۴-۲-۱- تاثیرات اصلی

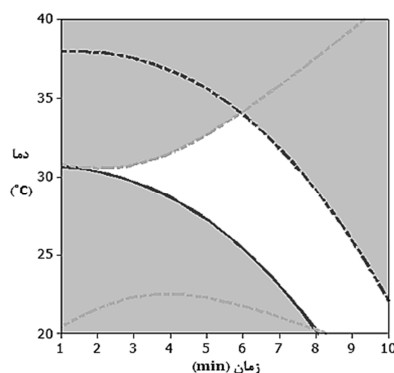
در شکل ۷ تاثیر مدت زمان عملیات بر زبری سطح نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش زمان از ۱ دقیقه به ۵/۵ دقیقه زبری سطح مقداری افزایش می یابد و با افزایش زمان تا ۱۰ دقیقه زبری سطح مقداری کاهش می یابد. در شکل ۸ تاثیر دمای عملیات بر زبری سطح نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش دما از ۲۰ به ۳۰ درجه زبری سطح کاهش می یابد و با افزایش دما تا ۴۰ درجه زبری سطح افزایش می یابد. در شکل های ۹ و ۱۰ به ترتیب تاثیر درصد اسیدهای HF و HNO3 را بر زبری سطح نشان می دهد. مشاهده می شود که تاثیر اسیدها هم بر زبری سطح روند افزایشی یا کاهشی ندارد. مطابق شکل های ۷، ۸ و ۱۰ تاثیر پارامترها بر زبری سطح روند صعودی یا نزولی ندارد و همچنین تاثیر پارامترها بر زبری سطح در محدوده متغیرها برای زمان حدود ۰/۰۳ میکرون، دما ۰/۰۴ میکرون، درصد اسید HF ۰/۰۳ میکرون و درصد اسید HNO3 حدود ۰/۰۲۵ میکرون هست بنابراین بیشترین تاثیر در اثر دما می باشد.



شکل ۱۲ اثر متقابل پارامترهای ماشین کاری در عمق باربرداری



شکل ۱۳ تاثیر زمان عملیات بر زبری سطح



شکل ۱۴ نمودار کانتوری روی هم افتاده دما-زمان برای ۸ درصد HF و ۳۰ درصد HNO₃

۵- نتیجه گیری

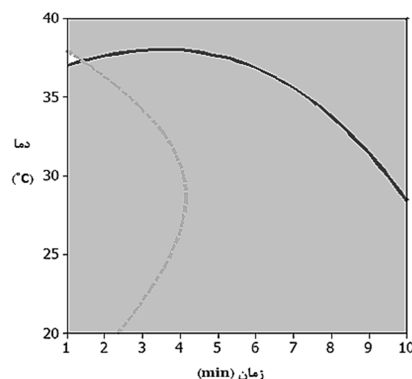
در این مقاله تأثیر پارامترهای درصد اسیدها، دما و زمان عملیات برای ماشین کاری شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V با روش طراحی و انجام آزمایش‌های تجربی بررسی شد. سپس با استفاده از روش روی هم قراردادن نمودارهای کانتوری، محدوده مناسب پارامترهای ماشین کاری برای زبری سطح و عمق باربرداری مطلوب جهت حذف لایه آلفای سطحی استخراج شد. نتایج حاصل را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد.

۱. افزایش دما در یک مدت زمان معین باعث افزایش عمق باربرداری و نرخ باربرداری می‌شود.
۲. با افزایش مدت زمان عملیات به علت گرمازا بودن واکنش و افزایش دما، عمق باربرداری با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد و به بیان دیگر نرخ باربرداری با افزایش زمان هم بیشتر می‌شود.
۳. با افزایش غلظت HF عمق باربرداری بیشتر می‌شود ولی با افزایش درصد HNO₃ عمق باربرداری نه تنها زیاد نمی‌شود، بلکه اندکی کاهش می‌یابد.
۴. بررسی اثر متقابل پارامترها نشان می‌دهد که اکثر پارامترهای ماشین کاری در تأثیر بر عمق باربرداری و زبری سطح با هم اثر متقابل دارند و با استفاده از نمودارهای اثرات اصلی و متقابل نمی‌توان محدوده مناسب برای پارامترها بدست آورد.
۵. با استفاده از روی هم قرار دادن نمودارهای کانتوری محدوده مناسب برای شرایط ماشین کاری شیمیایی جهت عمق باربرداری ۰/۲-۰/۱۵ میلی‌متر و زبری سطح کمتر از ۱ میکرون بدست آمد.

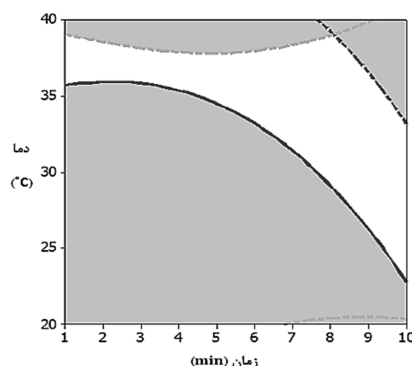
۶- مراجع

- [1] M. Landgworthy, *Chemical milling, nontraditional Machining Process, machining ASM Hand Book*, 1994.
- [2] K. Takahashi, T. Yamazaki, T. Nishijima, H. Shimizu, Effect of grain size and initial surface condition on glossiness and whiteness of the pickled titanium surface, *Nippon steel technical report*, No.85, 2002.
- [3] S. Ban, Y. Iwaya, H. Kono, H. Sato, Surface modification of titanium by etching in concentrated sulfuric acid, *dental materials*, Vol.22, pp. 1115-1120, 2006.
- [4] S. Ho, T. Nakahara, G. D. Hibbard, Chemical machining of nanocrystalline Ni, *journal of materials processing technology*. Vol.208, pp. 507-513, 2008.
- [5] M. Hadavifar, V. Alimirzaloo, M. Soleimanpoor, K. Karami, Investigation and optimization of the material removal rate in the pickling process of Ti6Al4V gas turbine motor compressor blade using the taguchi method, National conference of mechanic, Shiraz, 2013. (In Persian)
- [6] V. Alimirzaloo, *Optimization of the Final Forging Process of the Compressor Blade of an Aerial Motor*. Phd thesis, Amirkabir university of technology, 2011. (In Persian)
- [7] W. C. Say, Y. Y. Tsai, Surface characterization of cast Ti-6Al-4V in hydrofluoric-nitric pickling Solutions, *Surface and Coatings Technology*, Vol.176, pp. 337-343, 2004.

کمتر از ۱ میکرون باشد و با توجه به این که کنترل دما مشکل است، برای سه نوع درصد اسیدها، نمودارهای کانتوری روی هم افتاده دما- زمان به صورت شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ می‌شود. ناحیه سفید رنگ در داخل نمودارها محدوده پارامترهای دما و مدت زمان عملیات را برای زبری سطح کمتر از ۱ میکرون و عمق باربرداری ۰/۲-۰/۱۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در شکل ۱۲ برای به ترتیب ۲ و ۰ درصد HF و HNO₃ محدوده خیلی کوچکی برای دما و زمان عملیات وجود دارد. با توجه به مباحث مطرح شده در بخش ۲ در صورتی که از اسید HF بدون HNO₃ استفاده شود، هیدروژن حاصل از این واکنش در فلز پایه جذب شود که منجر به کاهش مقاومت به شکست قطعه می‌شود. بنابراین از محلول HF به تنهایی برای ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم استفاده نمی‌شود. لذا این شرایط مناسب برای ماشین کاری نیست. در شکل ۱۳ برای به ترتیب ۵ و ۱۵ درصد HF و HNO₃ محدوده مناسب برای دما و زمان عملیات نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش دمای عملیات، مدت زمان مناسب عملیات افزایش می‌یابد. و برای هر دمایی در محدوده ۲۳ تا ۳۹ درجه، مدت زمان مناسب عملیات مشخص شده است. طبق این نمودار در دمای محیط ۲۰ درجه شرایط مطلوب ماشین کاری وجود ندارد. در شکل ۱۴ برای به ترتیب ۸ و ۳۰ درصد HF و HNO₃ محدوده مناسب برای دما و زمان عملیات نشان داده شده است. در مقایسه با شکل ۱۳ می‌توان گفت که محدوده مناسب پارامترها مقداری محدودتر شده است ولی در دمای محیط ۲۰ درجه در این نمودار در مدت زمان عملیات ۸-۱۰ دقیقه شرایط مطلوب ماشین کاری حاصل می‌شود.



شکل ۱۲ نمودار کانتوری روی هم افتاده دما-زمان برای ۲ درصد HF و ۰ درصد HNO₃



شکل ۱۳ نمودار کانتوری روی هم افتاده دما-زمان برای ۵ درصد HF و ۱۵ درصد HNO₃

- chemical milling, pp.288-302, 1979.
- [11] D. J. Brimm, Unistructure-A new Concept for Light Weight Integrally Stiffened Skin Structures, SAE Technical Paper 801231, *society of automotive Engineers*, 1980.
- [12] Minitab software, V15, *user's guide*, technical manual, 2008.
- [13] R. Ranjithk, *Design Of Experiment Using the Taguchi approach*, Wiley, 2001.
- [8] K. Mutombo, P. Rossouw, Effect of pickling solution on the surface morphology of Ti6Al4V alloy investment cast, *Titanium 2011*, San Diego California, 2011.
- [9] V. Alimirzaloo, B. Khanahmadloo, Investigation of the chemical machining for removing of the alpha-case due to the hot forging of Ti-6Al-4V aerofoil, *journal Mechanics and Aerospace*, Vol. 10, No. 2, 2015. (In Persian)
- [10] H. W. Yankee, *Manufacturing processes*, prentice, Hall, INC, chapter 22,