(یادداشت مہندسی)

بررسی فرایند ماشین کاری شیمیایی لایه آلفای سطحی ناشی از عملیات فورج داغ ایرفویل از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V

بهزاد خان احمدلو ^۲ شرکت صنعت ساخت موتورهای توربینی

ولی علی میرزالو^{*۱}

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۰۱

چکیدہ

در این مقاله فرایند ماشین کاری شهمیایی ایرفویل یک نوع پره توربینی فورج شده از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شده است. بدین منظور ابتدا پره مورد نظر بهروش فورج داغ شکل دهی شده است، سپس ساختار متالورژیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از میکروساختار و روش سختی سنجی، لایه آلفای سطحی بررسی و اندازه گیری شده است. در مرحله بعدی فرایند ماشین کاری شیمیایی جهت باربرداری لایه آلفای سطحی مطالعه شده است. برای ماشین کاری از محلول شیمیایی اسیدنیتریک و اسیدفلوریک استفاده شده است. بررسیها نشان میده لایه آلفای سطحی در سطح ایرفویل فورج شده قابل توجه بوده و محلول شیمیایی مذکور میتواند لایه آلفای سطحی را بهطور کامل از سطح ایرفویل حذف کند. باربرداری از سطح ایرفویل تقریباً یکنواخت بوده و نرخ باربرداری با افزایش دما افزایش مییابد. همچنین با پیشروی عملیات، ابتدا به دلیل گرمازا بودن واکنش و تولید حرارت، نرخ باربرداری افزایش مییابد و سپس با کاهش غلظت اسیدها، نرخ باربرداری کاهش میابد.

واژههای کلیدی: ماشین کاری شیمیایی، ایرفویل، لایه آلفای سطحی، آلیاژ تیتانیوم

Investigation of the Chemical Machining for Removing of the Alpha-Case Due to the Hot Forging of Ti-6Al-4V Aerofoil

V. Alimirzaloo

B. Khanahmadloo

Mechanical Engineering Department Urmia University Industrial of Manufacturing of turbine motors Co., Tehran

(Received:19/August/2013; Accepted: 21/April/2014)

ABSTRACT

In this paper chemical machining of an aerofoil of a forged Ti-6AI-4V titanium alloy turbine blade has been investigated. First, the blade has been hot forged and then the metallurgical structure has been investigated. Using the microstructure and hardness measuring, surface alpha case has been investigated. Next, the chemical machining has been studied for removing of the alpha case. Hydrofluoric-nitric acid solution has been used for the chemical machining. Results show that the alpha case thickness on the forged aerofoil is considerable and the used chemical solution can remove it perfectly. Machining from the aerofoil surface is uniform and material removal rate increases as the temperature increases. During the chemical machining, first because of exothermic reaction, material removal rate increases, then it decreases because of decreasing the density of the acids.

Keywords: Chemical Machining, Aerofoil, Alpha Case, Titanium Alloy

۲- کارشناس

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

۱– مقدمه

موتورهای توربین گازی امروزه بهعنوان یک وسیله مبدل انرژی نقش مهمی را در صنعت بهویژه صنایع هوایی ایف امی کنند. با توجه به اینکه در صنایع هوایی از کار افتادن موتور خطرهای جانی و مالی فراوانی بههمراه دارد کیفیت اجزای توربین بهویژه پرههای بخش کمپرسور و توربین موتور دارای اهمیت بوده و ساخت آنها از فناوری نسبتاً بالایی برخوردار است. با توجه به قابلیت ماشین کاری پایین مواد مورد استفاده برای پرههای بخش کمیرسور (مانند آلیاژهای تیتانیوم)، برای ساخت این پرهها معمولاً از روشهای شکل دهی مانند فورج داغ استفاده می شود که علاوه بر شكل دهى به بهبود استحكام مكانيكي قطعه منجر مي شود. تيتانيوم و آلياژهاي آن در دو فرم آلوتروپيک فاز آلفا (hcp) و فاز بتا(bcc) وجود دارند. فاز آلفا که سخت فورج می شود معمولاً در دماهای پایین وجود دارد و فاز بتا که خیلی آسان فورج می شود در دماهای بالا بهوجود می آید. آلیاژ Ti-6AI-4V از نوع آلیاژهای تيتانيوم آلفا- بتا مے ،باشد كه درصد هـر دو فاز آلفا و بتا در آن قابل توجه است. در فرايند فورج داغ آلياژ تيتانيومTi-6Al-4V علاوه بر تغییر شکل قطعه، میکروساختار و درصد فازهای موجود در آن تغییر می کند [۳–۱]. یکی از مشکلاتی که بعد از فورج داغ این گونه آلپاژها ایجاد می شود به وجود آمدن لایه تردی در سطح قطعه به نام لایه آلفای سطحی است. در ناحیه سطح قطعه کار بهدلیل افت شدید دما، فاز آلفا غالب می شود که به عنوان فاز آلفای سطحي شناخته مي شود. لايه آلفاي سطحي منشأ بهوجود آمدن و رشد ترکهای سطحی و در نتیجه شکست قطعهها میباشد. با توجه به حساسیت قطعهها هوایی بهویژه پرههای توربینی، لازم است بعد از فورج قطعه، لایه آلفای سطحی باربرداری شود. روشهای مختلفی مانند سنگزنی، فرزکاری و ماشین کاری شیمیایی برای حذف این لایه می تواند استفاده شود. روش ماشین کاری شیمیایی با توجه به سهولت استفاده و كم هزينه بودن مقرون به صرفهتر است. ماشین کاری شیمیایی علاوه بر آلیاژهای تیتانیوم برای فلزات دیگری هم جهت باربرداری و بهبود کیفیت سطح استفاده می شود [۶-۴]. در زمینه ماشین کاری شیمیایی تیتانیوم و آلیاژ های آن گزارشهای کمی ارائه شده است. سوترر وگرندمونت^۳[۷] با بررسی تأثیر محلول اسیدنیتریک و اسیدهیدروفلوریک بر روی

تیتانیوم، فرمولهای تجزیه شیمیایی مربوطه را ارائه کردهاند و نشان دادهاند که با به همزدن محلول میزان باربرداری افزایش پیدا می کند. سی و تسای[†] [۸] در ماشین کاری شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V ریختے گری شدہ با محلول اسیدنیتریک و اسیدهیدروفلوریک بر روی تأثیر درصد اسیدها در محلول بر روی میزان باربرداری مطالعه کردهاند. آنها همچنین با بررسی الكتروشيميايي و استخراج منحنىهاي يلاريزاسيون، تأثير نسبت اسیدها را بر دانسیته جریانهای بهوجود آمده بررسی کردهاند. هانسن ⁶ و همکارانش [۹] اثر دما و زمان و نسبت اسیدنیتریک به اسیدهیدروفلوریک را در ماشین کاری شیمیایی آلیاژهای تیتانیوم بررسی کردهاند. موتوبو و روسو² [۱۰] مورفولوژی^۷ سطح حاصل از ماشینکاری شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V ریخته گری شده را بررسی کردهاند. و نشان دادند که با افزایش درصد اسیدفلوریک زبری سطح افزایش می یابد و با اسیدفسفریک می توان اثرات منفی اسیدهای نیتریک و فلوریک را کاهش داد. بان[^] و همکارانش [۱۱] اثر اسیدسولفوریک غلیظ را بر روی تیتانیوم برای بهبود سطح آن جهت کاربرد بیولوژیکی بررسی کردہاند. بررسے آنہا نشان مےدھد کہ اسیدسولفوریک غلیظ باعث افزایش صافی سطح می شود. در زمینه ماشین کاری شیمیایی ایرفویل فورج شده پرههای توربینی از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V تاکنون مطالعههای خاصبی گزارش نشده است. در این مقاله با بررسی متالورژیکی پره فورج شده، ضخامت لایه آلفای سطحی شناسایی شده است، سپس باربرداری این لایه با استفاده از روش ماشین کاری شیمیایی بررسی شده است.

۲- فورج داغ پره و بررسی متالورژیکی آن

آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V شامل مخلوطی از فازهای آلفا و بتا هستند که دارای مقدار کافی عناصر پایدار کننده فاز بتا در دمای اتاق بوده و ممکن است در دمای اتاق از ۱۰ تا ۵۰ درصد فاز بتا داشته باشد. در شکل ۱ نمودار دیاگرام فاز آلیاژهای تیتانیوم با ٪۶ عنصر آلومینیوم برای مقادیر مختلف وانادیوم نشان داده شده است. مشاهده می شود که برای آلیاژ Ti-6Al-4V با افزایش دما از میزان فاز آلفا کاسته می شود و بر مقدار فاز بتا افزوده می شود.

6- Mutombo and Rossouw

⁴⁻ Say and Tsai

⁵⁻ Hansen

⁷⁻ Morphology 8- Ban

¹⁻ Hexagonal Close-Packed 2- Body-Centered Cubic

²⁻ Douy-Centereu Cuo 2- Sutron - - d Curu durau

³⁻ Sutrer and Grandmont



شکل (۱): دیاگرام فاز برای آلیاژهای تیتانیوم با ۶٪ آلومینیوم [۱۲].

در این تحقیق، مواد خام مورد استفاده به عنوان آلیاژ -Ti-6Al ابتدا از لحاظ درصد عناصر تحلیل شد و مطابقت آن با AW استاندارد AMS ۴۹۲۸ تأیید گردید. مقادیر عناصر موجود در آلیاژ با استفاده استاندارد ۸ AMS ۴۹۲۸ تأیید گردید. مقادیر عناصر موجود در آلیاژ با استفاده از میکروساختار آلیاژ با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. برای متالوگرافی، ابتدا نمونهها مانت و پولیش شدند و سپس سطح نمونهها با استفاده استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. برای متالوگرافی، ابتدا نمونهها مانت و پولیش شدند و سپس سطح نمونهها با استفاده از محلول شیمیایی کرال^۲ (دارای HF % و استفاده از محلول شیمیایی کرال (دارای HNO3 % و استفاده از محلول شیمیایی کران (دارای قاز مورد استفاده نشان داده شده است. مشاهده میشود که آلیاژ دارای فاز آلفای رشته ی در زمینه فاز بتا میباشد. با استفاده از نرمافزار ایمیچ آنالیزر⁷ درصد فازهای آلفا و بتا محاسبه گردید و میزان فاز آلفا و بتا به ترمید.

جدول(۱): درصد عناصر آلياژ Ti-6Al-4V مورد استفاده.

Н	Al	V	Fe	0	С	N	عنصر
•/••٣	۶/۱۳	۴/۵	۰/۰۴	۰/۱۲۵	۰/۰۳۵	•/• ١٣	درصد

برای اجرای فرایند داغ پره مورد نظر، ابتدا قالبهای نهایی و قطعه پیشفرم طراحی شد سپس با شبیهسازی فرایند [۱۳] و اطمینان از صحت طراحیهای انجام شده، قالبها و قطعه پیشفرم ساخته شد. در گام بعدی، تجهیزات لازم، شامل پرسپیچی ساخت شرکت سیمپل کمپ[†] با تناژ ۴۳۰ تن و سرعت ۸۰۰ mm/s و کوره دارای کنترلر دما ساخت شرکت اکسایتون با حداکثر دمای

- 2- Kroll
- 3- Image Analyzer
- 4- Siempelkamp



شكل (٢): ميكروساختار آلياژ (X1000).

کارکرد دائم C°۲۰۰۰ تهیه گردیـد. بـا راهانـدازی کـوره در کنـار پرس، دمای کوره برای ۶۰۰ درجه سانتی گراد تنظیم شد. بعد از رسیدن دمای کوره بدین مقدار، قطعههای پیش فرم داخل کوره بارگذاری شدند و دمای کوره برای ۹۲۰ درجه سانتی گراد تنظیم گردید. بعد از رسیدن دما به این مقدار، جهت توزیع یکنواخت دما، قطعهها حداقل به مدت ۱۵ دقیقه در داخل کوره حرارتدهی شدند. سپس قطعه پیشفرم داغ در عرض حدود ۵ ثانیه از داخل کوره بر روی حفره قالب پایین منتقل و موقعیتدهی شد و عملیات فورج انجام گردید. برای انتقال پیش فرم داغ از یک انبر گرم شده استفاده شد و قالبها با استفاده از مشعل تا دمای حدود ۱۸۰ درجه سانتی گراد پیشگرم شدند [۱۳]. نمونهای از پرههای فورج شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در مرحله بعدی پره فورج شده از لحاظ متالورژیکی بررسی شد. بدین منظور ابتدا با مقطعزنی یره فورج شده نمونههای متالوگرافی مطابق شکل ۴ تهیه شد. سپس مانت و پولیش کاری شده و با استفاده از محلول کرال، اچ شدند. ساختار متالورژیکی قطعه های فورج شده با استفاده از میکروسکوب نوری بررسی گردید.



شکل (۳): نمونهای از پره فورج شده.



شکل (۴): نمونههای متالوگرافی از ایرفویل قطعات فورج شده.

¹⁻ Airspace Materials Specification

۳- فرایند ماشینکاری شیمیایی

فرایند ماشین کاری شیمیایی یکنوع ماشین کاری غیر سنتی میباشد که در آن از انرژی شیمیایی برای باربرداری از قطعهها استفاده میشود. در این فرایند، قسمتی از قطعه که قرار است ماشین کاری شود در تماس با یک محلول شیمیایی قرار داده میشود و از تماس محلول با بقیه قسمتهای قطعه با استفاده از روشهایی مانند موم گذاری جلو گیری میشود. محلولهای شیمیایی اغلب شامل مواد اسیدی یا بازی قوی هستند. اگر از محلول اسیدی برای فرایند استفاده شود واکنش شیمیایی به صورت زیر اتفاق می افتد:

M(s) + 2 H+ (aq) → H2(g) + M+ (aq) مثلاً اگر از محلول اسیدکلریدریک برای ماشینکاری فلـزات پایـه آهنی استفاده شود واکنش شیمیایی بهصورت زیر میشود:

 $Fe(S) + 2HCl(aq) \rightarrow H2(g) + FeCl(aq)$

در اثر این واکنش، گاز هیدروژن آزاد شده و کلرید آهن تولید میشود. برای ماشینکاری شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V معمولاً از محلول اسیدنیتریک و اسیدفلوریک استفاده میشود. اگر از اسیدفلوریک به تنهایی برای فرایند استفاده شود. اسیدفلوریک با تیتانیوم به صورت زیر واکنش می دهد:

 $2\text{Ti} + 2\text{HF} = 2\text{TiF} + \text{H}_2$

بنابرین در اثر این واکنش فلورید تیتانیوم و گاز هیدروژن تولید میشود. هیدروژن حاصل از واکنش میتواند در ساختار فلز پایه جذب شده و خواص مکانیکی آن را تغییر دهد از جمله ممکن است باعث کاهش مقاومت به شکست آن شود. برای جلوگیری از جذب هیدروژن از محلول اسیدنیتریک و اسیدفلوریک استفاده شده و در نتیجه از جذب هیدروژن به مقدار زیادی کاسته میشود [۱۴]. در این حالت، تیتانیوم موجود در آلیاژ به صورت زیر با محلول اسیدی واکنش میدهد [۸]:

 $Ti + 6HF + 4HNO_3 = 3H_2TiF_6 + 4H_2O + 4NO_2$

بررسی تجربی نشان میدهد که این واکنش گرمازا بوده و منجر به افزایش دمای محلول میشود. طبق رابطه فوق عنصر تیتانیوم از سطح قطعه با محلول اسیدی واکنش داده و باربرداری میشود. برای بررسی ماشین کاری شیمیایی نمونههای فورج شده ابتدا محلول شیمیایی با ترکیبی از ۲۲/۵ درصد اسیدنیتریک و ۷/۷ درصد اسیدهیدروفلوریک (۲۲ درصد اسیدنیتریک و 225ml HNO3+75ml/1 HF) تهیه شد. سپس نمونههای فورج شده در مدت زمان مشخصی داخل محلول اسیدی در دمای مختلف قرار داده شدند. سطح مقطع

نمونهها قبل و بعد از ماشینکاری با استفاده از دستگاه ^۲ CMM بررسی شدند و تغییر ضخامت نمونه اندازه گیری شد.

۴- نتایج و بحث

میکروساختار قطعه فورج شده در دمای کوره C°۹۲۰ در دو بخش ایرفویل و ریشه در شکلهای **۵** و ۶ نشان داده شده است. در قسمت ایرفویل، فاز آلفا بهصورت محوری و کمی رشتهای در زمینه فاز بتا بوده و در قسمت ریشه، فاز آلفا بهصورت محوری در زمینه فاز بتا میباشد. همچنین مشاهده میشود که فاز آلفا در قسمت ریشه بیشتر از قسمت ایرفویل است که ناشی از افزایش دمای قسمت ایرفویل در اثر حرارت حاصل از تغییر شکل زیاد نسبت به ریشه میباشد.



شکل (۵): میکروساختار قطعه فورج شده در ناحیه ایرفویل در دمای کوره ۵° ۹۲۰ (X500).



شکل (۶): میکروساختار قطعه فورج شده در ناحیه ریشه در دمای کوره C°۹۲۰ (X500).

¹⁻ Coordinate Measuring Machine

یکی از مواردی که در فورج داغ آلیاژ تیتانیوم باید توجه کرد بهوجود آمدن یک لایه فاز آلفای ترد در سطح پره فورج شده است که در اثر خنک شدن سریع سطح قطعه بهوجود میآید. لایه آلفای سطحی برای پره فورج شده در شکل ۷ نشان داده شده است. این لایه که لایه آلفای سطحی نامیده میشود موجب تشکیل و رشد میکروتر کها شده و عمر قطعه را کاهش میده و بنابراین لازم است میزان ضخامت این لایه تشخیص داده شده و باربرداری شود. مشاهده میشود که حداکثر ضخامت لایه، حدود ۱۲۰ میکرون هست.



شکل (۷): لایه آلفای سطحی در ایرفویل فورج شده در دمای ۲°۹۲۰ (X200).

برای تخمین دقیق تر ضخامت لایه آلفای سطحی، از روش سختی سنجی استفاده می شود. بدین صورت که با مقطع زدن قطعه از لبه قطعه به سمت داخل آن سختی اندازه گیری می شود. با توجه به سخت بودن لایه آلفای سطحی نسبت به قسمت داخلی قطعه، ضخامت لایه آلفا تشخیص داده می شود. بنابراین برای قطعات فورج شده در دماهای مختلف، سختی اندازه گیری شد نتایج سختی سنجی به صورت شکل ۸ به دست آمد. مشاهده می شود که برای همه نمونه ها، مقدار سختی در سطح قطعه نسبت به عمق آن زیاد است و به سمت داخل قطعه سختی کاهش می یابد و از ۲۰۰ میکرون به بعد سختی تقریباً ثابت می ماند. بنابراین حداکثر مقدار لایه آلفای سطحی حدود ۲۰۰ میکرون بنابراین حداکثر مقدار لایه آلفای سطحی حدود ۲۰۰ میکرون غیر مخرب مایع نافذ^۱ و استاندارد AMS2645 عیوب سطحی قطعه فورج شده مانند ماکروتر که ای سطحی بررسی شد مشاهده

گردید که قطعات فورج شده فاقد هـر گونـه مـاکروترک سـطحی هستند اما از لحاظ میکروترکها، در شکل ۶ مشاهده میشود که در لایه آلفای سطحی، ترکهای ریزی قابل مشاهده است.





با توجه به حداکثر ضخامت لایه آلفای سطحی (۲۰۰میکرون) لازم است این لایه باربرداری شود. بنابراین در مرحله بعد نمونههای فورج شده با استفاده از عملیات ماشین کاری شیمیایی مطابق بخش ۳ باربرداری شدند. اندازه گیری ضخامت نمونهها، قبل و بعد از ماشین کاری نشان میدهد که محلول استفاده شده توانایی حذف لایه آلفای سطحی را بهطور کامل دارد. بررسیها نشان میدهد که مقدار باربرداری به پارامترهایی مانند دمای محلول و مدت زمان عملیات و غلظت اسیدها بستگی دارد. با افزایش مدت زمان عملیات، میزان ضخامت باربرداری شده افزایش می یابد. مثلاً در دمای محیط C°۳۳ در مدت یک دقیقه و ۵ دقیقه مقدار ضخامت باربرداری شده بهترتیب ۰/۰۴ و ۰/۱۱ میلیمتر حاصل شد. همچنین اثر پارامتر دما هم بر میزان باربرداری بررسی شد. در شکل ۹ تغییرات ضخامت باربرداری بر حسب دمای محلول در مدت زمان ۵ دقیقه نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش دما، میزان باربرداری افزایش می یابد. با توجه به اینکه ضخامت لایه آلفای سطحی حدود ۲۰۰ میکرون (۲/۰میلیمتر) بود برای اینکه این لایه بهطور کامل از دو سطح ضخامت قطعه حذف شود لازم است برای مدت زمان باربرداری ۵ دقیقه، دمای محلول بالای °۴۵ باشد.

¹⁻ Fluorescent Penetrant Inspection

Υ٩



شکل(۹): تغییرات ضخامت باربرداری بر حسب دمای عملیات در مدت ۵ دقیقه.

همچنین هنگام اجرای عملیات ماشین کاری مشاهده گردید که به دلیل گرمازا بودن واکنش، با انجام عملیات، دمای محلول افزایش می ابد طوری که با قرار دادن یک نمونه پره فورج شده در داخل ۲ لیتر محلول در مدت ۸ دقیقه، دمای محلول ۲°۱۲ افزایش می یابد که منجر به افزایش نرخ باربرداری می شود. از طرف دیگر مشاهده گردید که با پیشروی بیشتر عملیات، قدرت باربرداری محلول اسیدی کاهش می یابد که ناشی از کاهش غلظت اسیدها با انجام واکنش شیمیایی می باشد. بنابراین در این عملیات پارامترهای دما، زمان و غلظت اسید علاوه بر تأثیر بر نرخ براده برداری بر روی همدیگر هم اثر گذار هستند.



قبل از ماشینکاری شیمیایی
بعد از ماشینکاری شیمیایی

شکل (۱۰): نقاط سطح مقطع ایرفویل قبل و بعد از ماشین کاری شیمیایی.

برای بررسی یکنواختی باربرداری در نواحی مختلف مقطع ایرفویل، سطح مقطع ایرفویل پره فورج شده قبل و بعد از عملیات ماشینکاری شیمیایی با استفاده از یک دستگاه CMM اندازه برداری شد. در شکل ۱۰ نقاط سطح مقطع ایرفویل در دو حالت نشان داده شده است. مشاهده می شود که با عملیات ماشینکاری شیمیایی، باربرداری تقریباً به طور یکنواخت انجام شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، فرایند ماشین کاری شیمیای لایه آلفای سطحی در ایرفویل پره فورج شده مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا با تهیه آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V و تجهیزات لازم، فرایند فورج داغ پره توربینی اجرا گردید و با استفاده از میکروسکوب نوری، پره فورج شده از لحاظ متالورژیکی بررسی شد و مشاهده شد که قسمت داخلی ایرفویل، دارای ساختار فاز آلفا بهصورت محوری و محمی رشتهای در زمینه فاز بتا بوده و در سطح ایرفویل فورج شده، یک لایه فاز آلفای ترد بهنام لایه آلفای سطحی تشکیل شده مند، یک لایه فاز آلفای ترد بهنام لایه آلفای سطحی تشکیل شده منده، یک لایه فاز آلفای ترد بهنام لایه آلفای سطحی تشکیل شده منده، یک در اثر خنک شدن سریع سطح قطعه به وجود میآرید. مخامت این لایه با استفاده از بررسی میکروساختاری و تست سختی سنجی حدود ۲۰۰ میکرون به دست آمد. در گام بعدی اجرای این عملیات نتایج زیر به دست آمد:

۱- اندازه گیری ضخامت نمونهها، قبل و بعد از ماشین کاری شیمیایی نشان میدهد که محلول استفاده شده میتواند لایه آلفای سطحی را بهطور کامل باربرداری کند. برای اینکه این لایه از دو سطح ضخامت قطعه حذف شود لازم است برای مدت زمان باربرداری ۵ دقیقه، دمای محلول بالای ۵°۴۵ باشد.

۲- با افزایش مدت زمان عملیات و دمای محلول، میزان ضخامت باربرداری شده افزایش می یابد و به دلیل گرمازا بودن واکنش، با انجام عملیات، دمای محلول افزایش می یابد که منجر به افزایش نرخ باربرداری می شود. از طرف دیگر با پیشروی بیشتر عملیات، به علت کاهش غلظت اسیدها، قدرت باربرداری محلول اسیدی کاهش می یابد.

۳- با اندازه برداری سطح مقطع ایرفویل پره فورج شده قبل و بعد از عملیات ماشینکاری شیمیایی. مشاهده شد که با عملیات ماشینکاری شیمیایی، باربرداری در نقاط مختلف سطح ایرفویل تقریباً بهطور یکنواخت انجام می شود.

- 6. Kladnig, W.F. "New Development of Acid Regeneration in Steel Pickling Plants", Int. J. Iron and Steel Research, Vol. 15, No. 4, pp. 01-06., 2008
- Sutrer, E.M.M. and Grandmont, G.J.G. "The Behavior of Titanium Nitric Hydrofluoric Acid Solutions, Corrosion Sci, Vol. 30, No. 4-5, pp. 461-476, 1990.
- Say, W.C. and Tsai, Y.Y. "Surface Characterization of Cast Ti-6Al-4V in Hydrofluoric-Nitric Pickling Solutions", Surface and Coatings Tech, Vol. 176, No. 3, pp. 337–343, 2004.
- 9. Hansen, J.O., Long, K.C., Jackson, M.A., and Hodgens, H.M. "Chemical Milling Process and Solution For Cast Titanium Alloys", United States Patent, 2004.
- Mutombo, K. and Rossouw, P. "Effect of Pickling Solution On the Surface Morphology of Ti6Al4V Alloy Investment Cast", Titanium, Int. Titanium Association, San Diego California, Octobre, 2011.
- yBan, S., Iwaya, Y., Kono, H., and Sato, H. "Surface Modification of Titanium By Etching in Concentrated Sulfuric Acid", Dental Materials Vol. 22, No. 22, pp. 1115–1120, 2006.
- ASM Handbook, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", ASM Int. Vol. 2, 1990.
- Alimirzaloo, V., Biglari, F.R. and Sadeghi, M.H. "Experimental and Numerical Investigation of the Hot Forging Process of Titanium Alloy Gas Turbine Compressor Blade", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 23-33.(In persian)
- Herbert W. Yankee, "Manufacturing processes", Prentice Hall INC, Chapter 22, Chemical Milling, pp. 288-302, 1979

TCN

با توجه به اینکه پارامترهای دما، مدت زمان عملیات و درصد اسیدها علاوه بر نرخ برادهبرداری به احتمال زیاد بر کیفیت سطح مانند زبری سطح اثرگذار است همچنین بررسیها نشان داد که پارامترهای مذکور بر روی همدیگر اثر تعامل^۱ دارند. بنابراین لازم است در ادامه این تحقیق این پارامترها برای نرخ برادهبرداری بهینه و همچنین کیفیت سطح مطلوب بهینهسازی شوند.

8- مراجع

- Martin, P.L. "Effects of Hot Working On the Microstructure of Ti-base alloys", Materials Sci. and Eng. A243. Vol. 243, No.1-2, pp. 25–31, 1998
- Hu, Z.M., Brooks, J.W., and Dean, T.A. "Experimental and Theoretical Analysis of Deformation and Microstructural Evolution in the Hot-Die Forging of Titanium Alloy Aerofoil Sections", J. Materials Proc. Tech. Vol. 88, No.1-3, pp. 251–265. 1999.
- Luo, J., Wu, B., and Li, M.q. "3D Finite Element Simulation of Microstructure Evolution in Blade Forging of Ti-6Al-4V Alloy Based On the Internal State Variable Models", Int. J. Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 19, No. 2, 2012, pp.122-130,
- 4. Ho, S., Nakahara, T. and Hibbard, G.D. "Chemical Machining of Nanocrystalline Ni", J. materials proc. Tech, Vol. 208, No.1-3, pp .507–513, 2008.
- Tehrani, A.F. and Imanian, E. "A new Etchant For the Chemical Machining of St304, J. Materials Proc. Tech, Vol. 149, No. 1-3, pp. 404–408. 2004

1- Interaction Effect