(یادداشت مهندسی)

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

ولی علی میرزالو*[۱] **بهزاد خان احمدلو [۲]**

دانشکده مهندسی مکانیک — شرکت صنعت ساخت موتورهای توربینی

دانشگاه ارومیه

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

چکیده

در این مقاله فرایند ماشین‌کاری شیمیایی 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 شکل‌دهی 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 اندازه‌گیری شده است. در مرحله بعدی فرایند ماشین‌کاری شیمیایی جهت باربرداری لایه آلفای سطحی مطالعه شده است. برای ماشین‌کاری از محلول شیمیایی اسیدنیتریک و اسیدفلوریک استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضخامت 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 به‌دلیل گرمازا بودن واکنش و تولید حرارت، نرخ باربرداری افزایش می‌یابد و سپس با کاهش غلظت اسیدها، نرخ باربرداری کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ماشین‌کاری 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 — Mechanical Engineering Department, Urmia University

B. Khanahmadloo — 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-6Al-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

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

۲- کارشناس

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

موتورهای توربین گازی امروزه به‌عنوان یک وسیله مبدل انرژی نقش مهمی را در صنعت به‌ویژه صنایع هوایی ایفا می‌کنند. 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 ماشین‌کاری پایین مواد مورد استفاده برای پره‌های بخش کمپرسور (مانند آلیاژهای تیتانیوم)، برای ساخت این پره‌ها معمولاً از روش‌های شکل‌دهی مانند فورج داغ استفاده می‌شود که علاوه بر شکل‌دهی به بهبود استحکام مکانیکی قطعه منجر می‌شود. تیتانیوم و آلیاژهای آن در دو فرم آلوتروپیک فاز آلفا (hcp)[1] و فاز بتا(bcc)[2] وجود دارند. فاز آلفا که سخت فورج می‌شود معمولاً در دماهای پایین وجود دارد و فاز بتا که خیلی آسان فورج می‌شود در دماهای بالا به‌وجود می‌آید. آلیاژ Ti-6Al-4V از نوع آلیاژهای تیتانیوم آلفا- بتا می‌باشد که درصد هر دو فاز آلفا و بتا در آن قابل توجه است. در فرایند فورج داغ آلیاژ تیتانیومTi-6Al-4V علاوه بر تغییر شکل قطعه، میکروساختار و درصد فازهای موجود در آن تغییر می‌کند [۳-۱]. یکی از مشکلاتی که بعد از فورج داغ این‌گونه آلیاژها ایجاد می‌شود به‌وجود آمدن لایه تردی در سطح قطعه به نام لایه آلفای سطحی است. در ناحیه سطح قطعه کار به‌دلیل افت شدید دما، فاز آلفا غالب می‌شود که به‌عنوان فاز آلفای سطحی شناخته می‌شود. لایه آلفای سطحی 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 ماشین‌کاری شیمیایی برای حذف این لایه می‌تواند استفاده شود. روش ماشین‌کاری شیمیایی با توجه به سهولت استفاده و کم هزینه بودن مقرون به صرفه‌تر است. ماشین‌کاری شیمیایی علاوه بر آلیاژهای تیتانیوم برای فلزات دیگری هم جهت باربرداری و بهبود کیفیت سطح استفاده می‌شود [۶-۴]. در زمینه ماشین‌کاری شیمیایی تیتانیوم و آلیاژ های آن گزارش‌های کمی ارائه شده است. سوترر وگرندمونت[3][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 می‌کند. سِی و تسای[4] [۸] در ماشین‌کاری شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V ریخته‌گری شده با محلول اسیدنیتریک و اسیدهیدروفلوریک بر روی تأثیر درصد اسیدها در محلول بر روی میزان باربرداری مطالعه کرده‌اند. آنها همچنین با بررسی الکتروشیمیایی و استخراج منحنی‌های پلاریزاسیون، تأثیر نسبت اسیدها را بر دانسیته جریان‌های به‌وجود آمده بررسی کرده‌اند. هانسِن[5] و همکارانش [۹] اثر دما و زمان و نسبت اسیدنیتریک به اسیدهیدروفلوریک را در ماشین‌کاری شیمیایی آلیاژهای تیتانیوم بررسی کرده‌اند. موتوبو و روسو[6] [۱۰] مورفولوژی[7] سطح حاصل از ماشین‌کاری شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V ریخته‌گری شده را بررسی کرده‌اند. و نشان دادند که با افزایش درصد اسیدفلوریک زبری سطح افزایش می‌یابد و با اسیدفسفریک می‌توان اثرات منفی اسیدهای نیتریک و فلوریک را کاهش داد. بان[8] و همکارانش [۱۱] اثر اسیدسولفوریک غلیظ را بر روی تیتانیوم برای بهبود سطح آن جهت کاربرد بیولوژیکی بررسی کرده‌اند. بررسی آنها نشان می‌دهد که اسیدسولفوریک غلیظ باعث افزایش صافی سطح می‌شود. در زمینه ماشین‌کاری شیمیایی ایرفویل فورج شده پره‌های توربینی از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V تاکنون مطالعه‌های خاصی 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 ماشین‌کاری شیمیایی بررسی شده است.

۲- فورج داغ پره و بررسی متالورژیکی آن

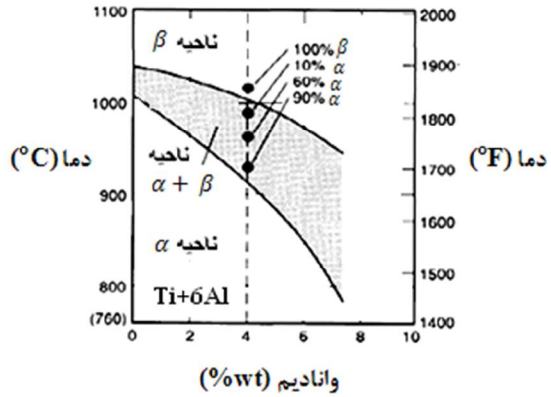
آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V شامل مخلوطی از فازهای آلفا و بتا هستند که دارای مقدار کافی عناصر پایدار کننده فاز بتا در دمای اتاق بوده و ممکن است در دمای اتاق از ۱۰ تا ۵۰ درصد فاز بتا داشته باشد. در شکل **۱** نمودار دیاگرام فاز آلیاژهای تیتانیوم با ٪۶ عنصر آلومینیوم برای مقادیر مختلف وانادیوم نشان داده شده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

1- Hexagonal Close-Packed
2- Body-Centered Cubic
3- Sutrer and Grandmont

4- Say and Tsai
5- Hansen
6- Mutombo and Rossouw
7- Morphology
8- Ban

Archive of SID

www.SID.ir



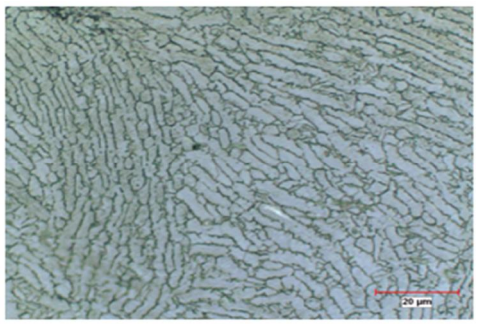
شکل (۱): دیاگرام فاز برای آلیاژهای تیتانیوم با ۶٪ آلومینیوم [۱۲].

در این تحقیق، مواد خام مورد استفاده به‌عنوان آلیاژ Ti-6Al-4V، ابتدا از لحاظ درصد عناصر تحلیل شد و مطابقت آن با استاندارد AMS ۴۹۲۸ [1] تأیید گردید. مقادیر عناصر موجود در آلیاژ به‌صورت جدول **۱** می‌باشد. همچنین 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 از محلول شیمیایی کرال [2] (دارای 8% HF و 10% HNO3) اچ شدند. در شکل **۲** میکروساختار آلیاژ مورد استفاده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که آلیاژ دارای فاز آلفای رشته‌ای در زمینه فاز بتا می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزار ایمیج آنالیزر [3] درصد فازهای آلفا و بتا محاسبه گردید و میزان فاز آلفا و بتا به‌ترتیب ۷۷ و ۲۳ درصد به‌دست آمد.

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

عنصر	N	C	O	Fe	V	Al	H
درصد	۰/۰۱۳	۰/۰۳۵	۰/۱۲۵	۰/۰۴	۴/۵	۶/۱۳	۰/۰۰۳

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 [4] با تناژ ۴۳۰تن و سرعت ۵۰۰ mm/s و کوره دارای کنترلر دما ساخت شرکت اکسایتون با حداکثر دمای



شکل (۲): میکروساختار آلیاژ (X1000) .

کارکرد دائم ۱۲۰۰°C تهیه گردید. با راه‌اندازی کوره در کنار پرس، دمای کوره برای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. بعد از رسیدن دمای کوره بدین مقدار، قطعه‌های پیش‌فرم داخل کوره بارگذاری شدند و دمای کوره برای ۹۲۰ درجه سانتی‌گراد 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 پیش‌فرم داغ از یک انبر گرم شده استفاده شد و قالب‌ها با استفاده از مشعل تا دمای حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد 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 پره 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 قطعه‌های 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
2- Kroll
3- Image Analyzer
4- Siempelkamp

Archive of SID

www.SID.ir

۳- فرایند ماشین‌کاری شیمیایی

فرایند ماشین‌کاری شیمیایی یک‌نوع ماشین‌کاری غیر سنتی می‌باشد که در آن از انرژی شیمیایی برای باربرداری از قطعه‌ها استفاده می‌شود. در این فرایند، قسمتی از قطعه که قرار است ماشین‌کاری شود در تماس با یک محلول شیمیایی قرار داده می‌شود و از تماس محلول با بقیه قسمت‌های قطعه با استفاده از روش‌هایی مانند موم‌گذاری جلوگیری می‌شود. محلول‌های شیمیایی اغلب شامل مواد اسیدی یا بازی قوی هستند. اگر از محلول اسیدی برای فرایند استفاده شود واکنش شیمیایی به‌صورت زیر اتفاق می‌افتد:

$$M(s) + 2\ H^+(aq) \rightarrow H_2(g) + M^+(aq)$$

مثلاً اگر از محلول اسیدکلریدریک برای ماشین‌کاری فلزات پایه آهنی استفاده شود واکنش شیمیایی به‌صورت زیر می‌شود:

$$Fe(S) + 2HCl(aq) \rightarrow H_2(g) + FeCl(aq)$$

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 به‌صورت زیر واکنش می‌دهد:

$$2Ti + 2HF = 2TiF + H_2$$

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 به‌صورت زیر با محلول اسیدی واکنش می‌دهد [۸]:

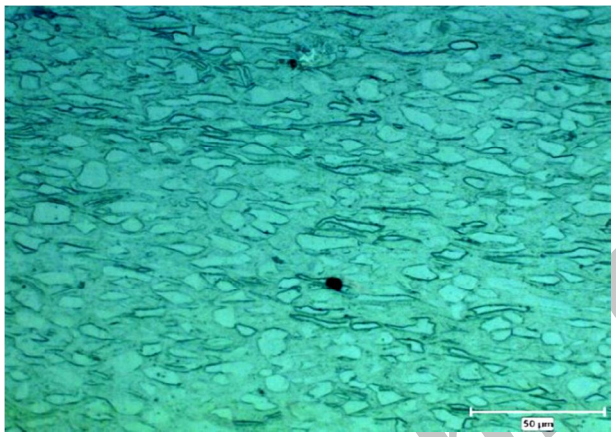
$$Ti + 6HF + 4HNO_3 = 3H_2TiF_6 + 4H_2O + 4NO_2$$

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.

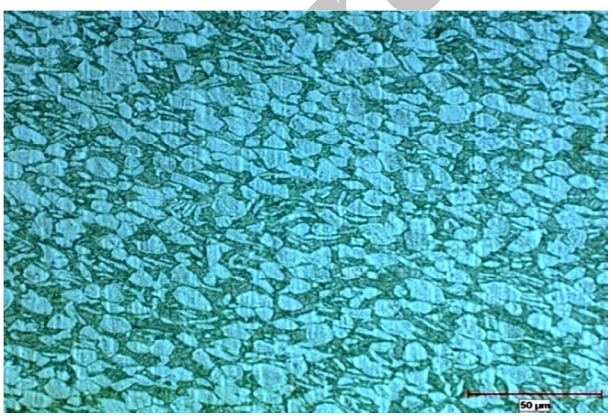
برای بررسی ماشین‌کاری شیمیایی نمونه‌های فورج شده ابتدا محلول شیمیایی با ترکیبی از ۲۲/۵ درصد اسیدنیتریک و ۷/۵ درصد اسیدهیدروفلوریک (225ml/l HNO3+75ml/l HF) تهیه شد. سپس نمونه‌های فورج شده در مدت زمان مشخصی داخل محلول اسیدی در دمای مختلف قرار داده شدند. سطح مقطع نمونه‌ها قبل و بعد از ماشین‌کاری با استفاده از دستگاه CMM[1] بررسی شدند و تغییر ضخامت نمونه اندازه‌گیری شد.

۴- نتایج و بحث

میکروساختار قطعه فورج شده در دمای کوره ۹۲۰°C 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 ۹۲۰°C (X500).



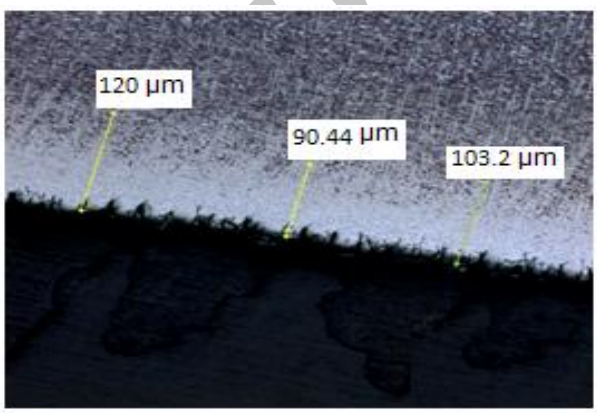
شکل (۶): میکروساختار قطعه فورج شده در ناحیه ریشه در دمای کوره ۹۲۰°C (X500).

1- Coordinate Measuring Machine

Archive of SID

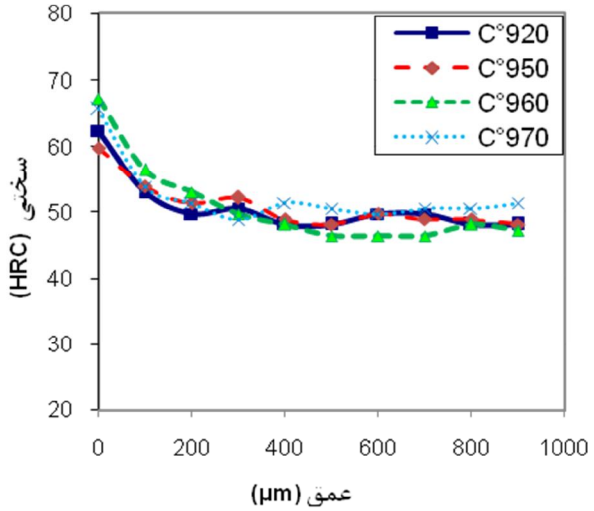
www.SID.ir

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 میکروترک‌ها شده و عمر قطعه را کاهش می‌دهد 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 ۹۲۰°C (X200).

برای تخمین دقیق‌تر ضخامت لایه آلفای سطحی، از روش سختی‌سنجی استفاده می‌شود. بدین‌صورت که با مقطع زدن قطعه از لبه قطعه به سمت داخل آن سختی اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به سخت بودن لایه آلفای سطحی نسبت به قسمت داخلی قطعه، ضخامت لایه آلفا تشخیص داده می‌شود. بنابراین برای قطعات فورج شده در دماهای مختلف، سختی اندازه‌گیری شد نتایج سختی‌سنجی به‌صورت شکل **۸** به‌دست آمد. مشاهده می‌شود که برای همه نمونه‌ها، مقدار سختی در سطح قطعه نسبت به عمق آن زیاد است و به سمت داخل قطعه سختی کاهش می‌یابد و از ۲۰۰ میکرون به بعد سختی تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین حداکثر مقدار لایه آلفای سطحی حدود ۲۰۰ میکرون تشخیص داده می‌شود. همچنین با استفاده از روش تست غیرمخرب مایع نافذ[1] و استاندارد AMS2645 عیوب سطحی قطعه فورج شده مانند ماکروترک‌های سطحی بررسی شد مشاهده گردید که قطعات فورج شده فاقد هر گونه ماکروترک سطحی هستند اما از لحاظ میکروترک‌ها، در شکل **۶** مشاهده می‌شود که در لایه آلفای سطحی، ترک‌های ریزی قابل مشاهده است.

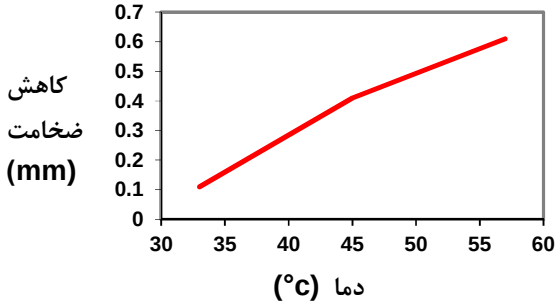


شکل (۸): نمودار تغییرات سختی از سطح به عمق قطعات فورج شده در دماهای مختلف.

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 ماشین‌کاری شیمیایی مطابق بخش ۳ باربرداری شدند. اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها، قبل و بعد از ماشین‌کاری 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 می‌یابد. مثلاً در دمای محیط ۳۳°C 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 می‌شود که با افزایش دما، میزان باربرداری افزایش می یابد. با توجه به اینکه ضخامت لایه آلفای سطحی حدود ۲۰۰ میکرون (۰/۲میلی‌متر) 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°C باشد.

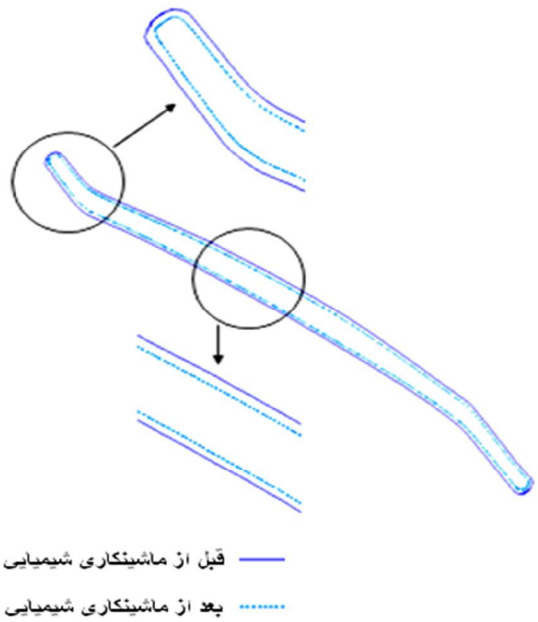
1- Fluorescent Penetrant Inspection

Archive
www.SID.ir



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

همچنین هنگام اجرای عملیات ماشین‌کاری مشاهده گردید که به دلیل گرمازا بودن واکنش، با انجام عملیات، دمای محلول افزایش می‌یابد طوری‌که با قرار دادن یک نمونه پره فورج شده در داخل ۲ لیتر محلول در مدت ۸ دقیقه، دمای محلول ۱۲°C افزایش می‌یابد که منجر به افزایش نرخ باربرداری می‌شود. از طرف دیگر مشاهده گردید که با پیشروی بیشتر عملیات، قدرت باربرداری محلول اسیدی کاهش می‌یابد که ناشی از کاهش غلظت اسیدها با انجام واکنش شیمیایی می‌باشد. بنابراین در این عملیات پارامترهای دما، زمان و غلظت اسید علاوه بر تأثیر بر نرخ براده‌برداری بر روی همدیگر هم اثرگذار هستند.



شکل (۱۰): نقاط سطح مقطع ایرفویل قبل و بعد از ماشین‌کاری 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 می‌شود که با عملیات ماشین‌کاری شیمیایی، باربرداری تقریباً به‌طور یکنواخت انجام شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرایند ماشین‌کاری 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 کمی رشته‌ای در زمینه فاز بتا بوده و در سطح ایرفویل فورج شده، یک لایه فاز آلفای ترد به‌نام لایه آلفای سطحی تشکیل شده است که در اثر خنک شدن سریع سطح قطعه به‌وجود می‌آید. ضخامت این لایه با استفاده از بررسی میکروساختاری و تست سختی سنجی حدود ۲۰۰ میکرون به‌دست آمد. در گام بعدی برای حذف این لایه عملیات ماشین‌کاری شیمیایی انجام شد. با اجرای این عملیات نتایج زیر به‌دست آمد:

۱- اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها، قبل و بعد از ماشین‌کاری 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 ۴۵°C باشد.

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

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 می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

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[1] دارند. بنابراین لازم است در ادامه این تحقیق این پارامترها برای نرخ براده‌برداری بهینه و همچنین کیفیت سطح مطلوب بهینه‌سازی شوند.

۶- مراجع

1. 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
2. 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.
3. 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.
5. 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
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
7. 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.
8. 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.
10. 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.
11. 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.
12. ASM Handbook, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", ASM Int. Vol. 2, 1990.
13. 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)
14. Herbert W. Yankee, "Manufacturing processes", Prentice Hall INC, Chapter 22 , Chemical Milling, pp. 288-302, 1979

1- Interaction Effect

Archive of SID

www.SID.ir