

بررسی عددی و تجربی فرایند فورج داغ پره کمپرسور موتور توربین گازی از جنس آلیاژ تیتانیوم

ولی علی میرزالو^۱ فریدرضا بیگلری^۲ محمدحسین صادقی^۳
دانشکده فنی مهندسی دانشکده مهندسی مکانیک دانشکده فنی مهندسی
دانشگاه ارومیه دانشگاه صنعتی امیرکبیر دانشگاه تربیت مدرس
(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۸/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۲۳)

چکیده

فورج داغ پره کمپرسور موتورهای توربین گازی به علت پیچیدگی‌های خاص مکانیکی و متالورژیکی نیاز به مطالعه عددی و تجربی دارد. در این تحقیق، فرایند فورج داغ یک نوع پره کمپرسور موتور توربینی گازی هوایی از جنس آلیاژ تیتانیوم با استفاده از روش المان محدود تحلیل شده، سپس به صورت عملی اجرا گردیده است. برای شبیه‌سازی عددی فرایند، ابتدا رفتار مکانیکی آلیاژ بررسی و مدل مناسب برای تحلیل فرایند مشخص شده، سپس شرایط مرزی اصطکاکی با استفاده از آزمایش رینگ استخراج شده است. با شبیه‌سازی سه‌بعدی فرایند، مواردی از قبیل جریان مواد و پر شدن حفره قالب، توزیع کرنش و دما، تناژ لازم فرایند و تغییرات نیروهای جانبی اعمال شده به قالب بررسی شده است. در گام بعدی مطابق شرایط شبیه‌سازی، فرایند به صورت تجربی اجرا شده و نتایج عملی با نتایج شبیه‌سازی فرایند مقایسه شده است. نتایج حاکی از موفقیت‌آمیز بودن فرایند است و مقایسه نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی فرایند توانایی پیش‌بینی قابل قبول پارامترهای فرایند را دارد.

واژه‌های کلیدی: فورج داغ، پره کمپرسور، المان محدود، آلیاژ Ti-6Al-4V

Experimental and Numerical Investigation of the Hot Forging Process of Titanium Alloy Gas Turbine Compressor Blade

V. Alimirzaloo F.R. Biglari M.H. Sadeghi
Eng. Dep't. Mech. Eng. Dep't. Eng. Dep't.
Urmia Univ. Amirkabir Univ. of Tech. Tarbiat modarres Univ.
(Received: 31 Octobr , 2010; Accepted: 14 Mars , 2012)

ABSTRACT

Hot forging of the aerofoil blades has complicated mechanical and metallurgical characteristics therefore; it needs numerical and experimental investigations. In this research, hot forging process of a titanium alloy aerofoil blade has been analyzed by finite element method. Then experimental tests have executed. For the numerical simulation, first material behavior of the titanium alloy has been investigated then friction factor has been obtained by ring test. Using the process simulation, material flow, die cavity filling, strain and temperature distribution, forging load and lateral forces applied the dies during the forging process have been investigated. In the next stage, trial tests have been executed. At last, numerical results have been compared with the experimental results. Results show that the forging process has been done successfully and simulation results have a good agreement with the experimental results.

Keywords: Hot Forging, Aerofoil Blade, Finite Element, Ti-6Al-4V

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

۲- دانشیار: biglari@aut.ac.ir

۳- استاد: sadeghim@modares.ac.ir

۱- مقدمه

در ۲۰۰۱ ژان^۳ و همکارانش [۸] با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی، فورج هم‌دمای پره از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V را با ملاحظه اصطکاک بین قالب و قطعه و استفاده از مش‌بندی مجدد، شبیه‌سازی کرده‌اند.

در ۲۰۰۱ لو^۴ و بالندرا^۵ [۹] با شبیه‌سازی المان محدود فرایند فورج پره، خطاهای ابعادی مقطع ایرفویل پره توربینی در اثر تغییر شکل الاستیکی حفره قالب و اعوجاج پره در حین باربرداری و خنک کاری را برای یک محدوده دمایی فورج بررسی کرده‌اند.

در ۲۰۰۱ هو^۶ و دیان^۷ [۶] برای شبیه‌سازی واقعی‌تر فرایند فورج پره، شرایط فرایند از جمله رفتار مکانیکی آلیاژ و شرایط مرزی را با استفاده از آزمایش‌های تجربی به‌دست آورده‌اند و فورج قالب داغ پره را برای تولید نزدیک به شکل نهایی آن بررسی کرده‌اند.

در طی سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۲ او^۸ و همکارانش [۱۰-۱۲] تحقیقاتی را بر روی بهینه‌سازی قالب‌های فورج پره انجام داده‌اند. آنها با بررسی خطاهای ابعادی ناشی از تغییر شکل الاستیکی قالب‌ها، تغییر شکل پرس و اعوجاج‌های حرارتی در طی سرد شدن در فورج پره تیتانیومی، پروفیل قالب‌ها را بهینه‌سازی کرده‌اند.

در ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ تاو^۹ و همکارانش [۱۳-۱۴] فرایند فورج دقیق پره را به‌طور معکوس با استفاده از روش ردیابی معکوس و المان محدود شبیه‌سازی کرده‌اند و با کنترل شرایط مرزی به‌وسیله اصلاح زمان جدا شدن گره‌های مرزی از قالب‌ها، اثر شرایط مرزی دینامیکی بر طرح پیش‌فرم را جهت ایجاد تغییر شکل یکنواخت بررسی کرده‌اند.

در ۲۰۰۸ ال وی^{۱۰} و همکارانش [۷] مراحل مختلف فرایند فورج پره کمپرسور، از بیلت^{۱۱} اولیه تا شکل پیچیده نهایی را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کرده و به‌صورت عملی اجرا نموده‌اند. پره مورد نظر در این تحقیق از جنس

پره کمپرسور موتورهای توربین گازی دارای شکل پیچیده‌ای است که شامل ریشه ضخیم و ایرفویل با ضخامت کم و متغیر است. جنس این پره‌ها معمولاً از مواد مقاوم مانند آلیاژهای تیتانیوم است. آلیاژهای تیتانیوم دارای نسبت استحکام به چگالی، بالا و مقاومت به خوردگی، خوب هستند و به‌طور گسترده در صنایع هوافضا کاربرد دارند. با توجه به قابلیت ماشین‌کاری پایین آلیاژ تیتانیوم، و خواص ناشی از فرایند فورج، ساخت پره کمپرسور از جنس آلیاژ تیتانیوم با استفاده از فرایند فورج داغ مقرون به صرفه است. فورج داغ پره‌های تیتانیومی به‌خاطر تغییر خواص ماده در حین فرایند و اعمال تنش‌های حرارتی و مکانیکی قابل توجه به قالب‌ها، عملیات پیچیده‌ای است و به‌دست آوردن اطلاعات کمی در مورد آن نیاز به استفاده از روش‌های عددی همراه با عملیات تجربی دارد. به‌خاطر پیچیدگی‌های زیاد فرایند در حالت سه‌بعدی، تعدادی از محققان فرایند فورج پره را به‌صورت دوبعدی تحلیل کرده‌اند [۳-۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با توجه به شکل پره، شبیه‌سازی دوبعدی، آن را از واقعیت دور می‌کند. به‌همین خاطر لازم است فرایند به‌صورت سه‌بعدی تحلیل شود. تاکنون فرایند فورج پره توسط بعضی محققان به‌صورت سه‌بعدی تحلیل شده است و در بعضی منابع هم علاوه بر نتایج تحلیلی به کارهای تجربی اشاره شده است [۷-۴]. از کارهای قابل توجه در زمینه فورج پره در سال‌های اخیر به این موارد می‌توان اشاره کرد:

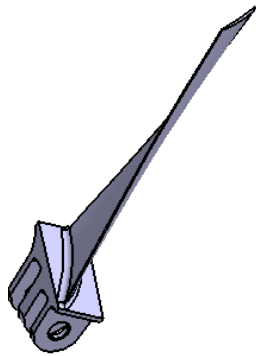
در ۱۹۹۸ بروکس^۱ و همکارانش [۴] با استخراج یک مدل فیزیکی برای رفتار مکانیکی یک نوع آلیاژ تیتانیوم-آلومینیم، فورج هم‌دمای پره را به‌صورت سه‌بعدی با روش المان محدود شبیه‌سازی کرده و نتایج آن را با نتایج تجربی مقایسه کرده‌اند.

در ۱۹۹۹ هو^۲ و همکارانش [۵] با استفاده از پارامترهای دما، تنش، کرنش و یک متغیر حالت درونی، تحولات میکروساختاری پره در طی فرایند فورج قالب داغ پره از جنس آلیاژ تیتانیوم را به روش‌های عددی و تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند.

1- Brooks
2- Hu

3- Zhan
4- Lu
5- Balendra
6- Hu
7- Dean
8- Ou
9- Tao
10- Lv
11- Billet

امری ضروری است. با توجه به قابلیت‌های روش تحلیل المان محدود از جمله اینکه اطلاعات زیادی از فرایند فورج را می‌تواند فراهم کند، این روش مناسب‌ترین روش برای شبیه‌سازی فرایند است. نرم‌افزار DEFORM 3D به‌خاطر قابلیت‌هایی که در تحلیل سه‌بعدی فرایندهای فورج دارد، تاکنون در منابع مختلفی استفاده شده است [۱۷ و ۱۸]. در این تحقیق از این نرم‌افزار برای تحلیل فورج پره استفاده شده است. برای تحلیل واقعی‌تر فرایند لازم است اطلاعات مربوط به رفتار مکانیکی ماده مورد استفاده برای قطعه‌کار و شرایط مرزی مانند اصطکاک با استفاده از آزمایش‌های مربوطه استخراج شود. اطمینان به نتایج تحلیل تا حدود زیادی به صحت این اطلاعات بستگی دارد.



شکل (۱): مدل هندسی پره.

۲-۱- رفتار مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V

برای استخراج رفتار مکانیکی مواد معمولاً از آزمایش فشار استفاده می‌شود. تاکنون توسط محققان مختلفی رفتار مکانیکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شده است [۱۶-۱۸ و ۱۹]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که رفتار مکانیکی آلیاژ مورد نظر به دما و نرخ کرنش وابسته است. بنابراین برای استخراج مدل رفتار مکانیکی آلیاژ، آزمایش فشار در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف انجام می‌شود. برای اجرای صحیح آزمایش فشار لازم است هر آزمایش در شرایط هم‌دما و نرخ کرنش ثابت انجام شود. با توجه به محدودیت‌های امکاناتی در داخل کشور، امکان انجام آزمایش فشار داغ در نرخ کرنش ثابت وجود ندارد و اغلب در نرخ کرنش متغیر انجام و سپس متوسط‌گیری می‌شود و همچنین آزمایش‌ها

آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V است. محققان مختلفی رفتار مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V را بررسی کرده‌اند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مدل ارائه شده توسط هو و دیان [۶]، مدل شاین^۱ و همکارانش [۱۵] و مدل پرسد^۲ و همکارانش [۱۶] اشاره کرد. در بخش ۲ نتایج این مدل‌ها با نتیجه آزمایش تجربی برای آلیاژ استفاده شده در این مقاله، مقایسه شده است.

بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده در زمینه فورج پره‌های تیتانیومی اغلب به‌صورت عددی است و در تعدادی از مطالعات هم علاوه بر تحلیل عددی با فرضیات شرایط مرزی، مطالعه تجربی هم انجام شده، ولی به مقایسه نتایج دو روش کمتر توجه شده است. در این مطالعه ابتدا مدل‌های رفتار مکانیکی که برای آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V ارائه شده، با استفاده از آزمایش تجربی ارزیابی شده و بهترین مدل برای تحلیل فرایند انتخاب شده، سپس با استفاده از آزمایش رینگ مقدار ضریب اصطکاک استخراج شده است. با تحلیل فرایند به‌روش المان محدود، موارد مختلفی مانند دما، کرنش و نیروها بررسی شده و در نهایت به اجرای عملی فرایند پرداخته شده است و ابعاد پره فورج شده تجربی با پره حاصل از تحلیل المان محدود در حد امکانات موجود مقایسه شده است.

۲-۲- تحلیل المان محدود

پره مورد نظر مطابق شکل ۱ دارای ریشه ضخیم و ایرفویل نازک با ضخامت متغیر و دارای یک پیچش از ابتدا تا انتها است. با توجه به اختلاف زیاد ضخامت ریشه با ایرفویل، فرایند مناسب برای شکل‌دهی پره شامل اکستروژن و فورج است که در طی فرایند اکستروژن شکل پیش‌فرم به‌دست می‌آید. سپس طی عملیات فورج داغ شکل کلی نزدیک به ساینز نهایی پره حاصل می‌شود. در این تحقیق بر روی فرایند فورج پره متمرکز شده است.

از آنجا که اجرای عملی فرایند فورج پره هزینه‌بر است اجرای روش سنتی خطا و آزمون عملی برای این فرایند خطر بالایی است و شبیه‌سازی فرایند فورج قبل از اجرای آن

1- Shin
2- Prasad

۲-۲- شرایط اصطکاکی

یکی از موارد مهم جهت شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت فرایند فورج پره، اعمال شرایط مرزی صحیح است. شرایط اصطکاکی بین قالب‌ها و قطعه نقش مهمی در تحلیل واقعی‌تر فرایند دارد. تاکنون مدل‌های مختلفی برای شرایط اصطکاکی ارائه شده است. برای فرایندهای فورج با توجه به اینکه فرایند در ناحیه پلاستیک اتفاق می‌افتد، معمولاً از مدل برشی استفاده می‌شود که به صورت زیر است:

$$f = mk, \quad (1)$$

که در آن، f نیروی اصطکاکی، m ضریب اصطکاک و k تنش تسلیم برشی است. برای تحلیل المان محدود فرایند، لازم است ضریب اصطکاک واقعی فرایند استخراج شود.

برای ضریب اصطکاک از آزمایش‌های مختلفی مانند آزمایش رینگ و اکستروود معکوس استفاده می‌شود. در این تحقیق از آزمایش رینگ که نسبت به سایر آزمایش‌ها ساده‌تر و کم هزینه‌تر است، استفاده شد. بدین منظور از قطعه رینگی شکل با ابعاد ۱۹/۰۵، ۹/۵۲ و ۶/۳۵ به ترتیب برای قطر خارجی، قطر داخلی و ضخامت استفاده شد. برای روان کاری در فورج عملی پره از گرافیت استفاده شده است. بنابراین ضریب اصطکاک برای این روان کار استخراج شد.



الف



ب

شکل (۳): نمونه استوانه‌ای شکل الف) قبل از عملیات

کله‌زنی ب) بعد از عملیات کله‌زنی.

در سرعت‌های خیلی پایین‌تر از سرعت استفاده شده در فورج پره انجام می‌شود. با توجه به اینکه رفتار مکانیکی آلیاژ مورد نظر تاکنون توسط محققان مختلف استخراج شده است و در این تحقیقات از نرخ کرنش ثابت و بالا استفاده شده است، ارزیابی مدل‌های ارائه شده و استفاده از مدلی که تطابق خوبی با ماده مورد استفاده دارد، مناسب به نظر می‌رسد. در این تحقیق یک عملیات کله‌زنی بر روی قطعه استوانه‌ای شکل به قطر ۵/۹۵ mm و طول ۱۰ mm در دمای ۹۰۰ °C و سرعت رم ۲۵۰ mm/min به صورت تجربی انجام شده و از طرف دیگر فرایند با روش المان محدود با استفاده از مدل‌های رفتاری ارائه شده توسط محققان قبلی، تحلیل شده است. تغییرات نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش تجربی با نتایج المان محدود هریک از مدل‌ها مقایسه شده است و بهترین مدل رفتاری برای آلیاژ مورد نظر انتخاب شده است. برای انجام آزمایش مورد نظر از دستگاه آزمایش فشار مطابق شکل ۲ استفاده شد. در شکل ۳ نمونه استوانه‌ای شکل قبل و بعد از عملیات کله‌زنی نشان داده شده است.

در شکل ۴ نتایج المان محدود حاصل از ۴ مدل رفتار مکانیکی ارائه شده توسط محققان قبلی، شامل مدل هو و دیان [۶]، مدل شاین و همکارانش [۱۵]، مدل پرسد و همکارانش [۱۶]، مدل ارائه شده توسط نرم‌افزار DEFORM [۱۸]، و نمودار تجربی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل رفتاری پرسد و همکارانش انطباق بهتری با آلیاژ استفاده شده دارد. بنابراین در این تحقیق، برای تحلیل المان محدود فرایند فورج پره مورد نظر از مدل مذکور استفاده شده است.

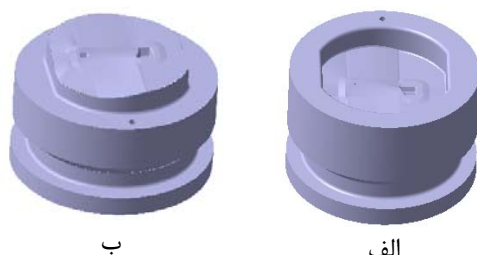


شکل (۲): دستگاه آزمایش فشار.

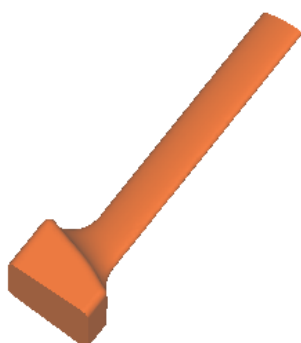
۲-۳- مدل المان محدود فرایند فورج پره

برای تحلیل فرایند فورج پره به روش المان محدود، ابتدا با توجه به قطعه نهایی مطلوب حاصل از فورج، قالبها مطابق شکل ۶ طراحی شدند و با توجه به فرایند ساخت پره، شکل کلی پیش فرم مطابق شکل ۷ طوری طراحی شده است که با استفاده از فرایند اکستروژن قابل ساخت باشد.

از آنجا که فرایند فورج پره به صورت غیر همدمما انجام می شود، پیش فرم ابتدا در کوره گرم شده، سپس بر روی قالبها منتقل می شود. فرایند در دو مرحله شامل سرد شدن در طی انتقال پیش فرم از کوره بر روی قالب پایینی و مرحله فورج پیش فرم تحلیل شد. برای تحلیل مرحله اول، مدت زمان انتقال پیش فرم از کوره بر روی قالبها با توجه به نتایج تجربی، ۶/۵ ثانیه گرفته شد. خواص فیزیکی - حرارتی آلیاژ Ti-6Al-4V به صورت جدول ۱ استفاده شد و دمای محیط 20°C لحاظ گردید. برای مش بندی قطعه کار از المان هرمی شکل و به تعداد ۴۷۶۷۳ المان استفاده شد.

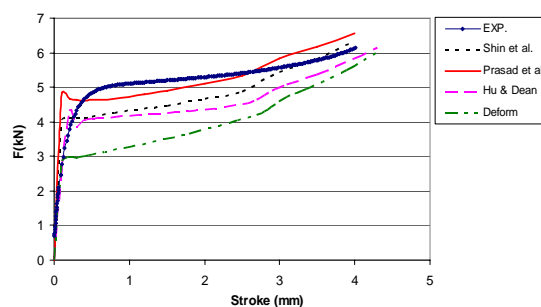


شکل (۶): مدل هندسی قالب الف) نیمه بالایی
ب) نیمه پایینی.

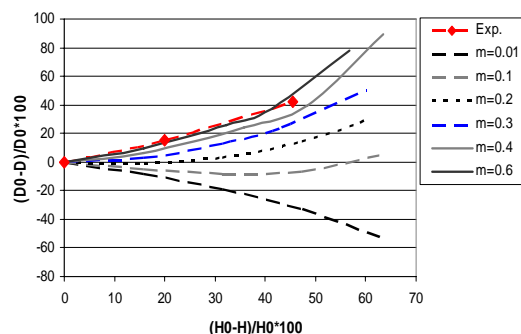


شکل (۷): مدل هندسی پیش فرم.

طبق تحقیقات انجام شده، شرایط آزمایش رینگ هر چقدر به شرایط فورج قطعه اصلی (پره) نزدیک تر باشد، بهتر است [۱۷]. ابتدا رینگها تا دمای 970°C در داخل کوره گرم شدند و سپس با استفاده از یک پرس مکانیکی با سرعت حدود 154 mm/s بین دو قالب تخت در نسبت ضخامت های مختلف تغییر شکل داده شدند. قطر داخلی و ضخامت نمونه های تغییر شکل داده شده، اندازه گیری شد. برای استخراج ضریب اصطکاک، نمودارهای کالیبراسیون ضریب اصطکاک استخراج گردید. نمودارهای کالیبراسیون از تحلیل المان محدود فرایند آزمایش رینگ برای ضریب اصطکاک های مختلف به دست می آیند. در شکل ۵ نمودارهای کالیبراسیون به همراه نمودار حاصل از آزمایش رینگ روان کار گرافیت نشان داده شده است. مشاهده می شود که آزمایش رینگ ضریب اصطکاک حدود ۰/۶ را برای این روان کار پیش بینی می کند.



شکل (۴): تغییرات نیرو- جابه جایی حاصل از تحلیل المان محدود با استفاده از مدل های رفتار مکانیکی ارائه شده و آزمایش تجربی.



شکل (۵): نمودارهای کالیبراسیون به همراه نمودار حاصل از آزمایش رینگ برای روان کار گرافیت.



شکل (۹): روند تغییر شکل و جریان مواد از قطعه پیش‌فرم تا شکل نهایی.

فرایند ماشین‌کاری قالب‌ها با استفاده از نرم‌افزار UNIGRAPHICS شبیه‌سازی و کد ماشین‌کاری تهیه شد. در مرحله بعد با استفاده از دستگاه‌های تراش و فرز CNC بلوک اولیه ماشین‌کاری شد. بعد از کنترل ابعادی، قالب‌ها توسط عملیات حرارتی تا ۴۸ راکول سخت‌کاری شدند. سپس برای بررسی عیوب داخلی و سطحی به ترتیب آزمایش‌های غیرمخرب آلتراسونیک و ذرات مغناطیسی انجام شد و از سالم بودن قالب‌ها اطمینان حاصل شد. در مرحله بعد برای جریان بهتر مواد در عملیات فورج، حفره قالب‌ها و محل پلیسه پولیش‌کاری شد. در پایان با استفاده از دستگاه CMM^۱ حفره قالب‌ها کنترل ابعادی شد. در شکل ۱۰ قالب‌های ساخته شده، نشان داده شده‌اند.

قطعه پیش‌فرم به‌روش ماشین‌کاری با استفاده از فرز CNC مطابق شکل ۱۱ ساخته شد. لازم به‌ذکر است که طبق فرایند اصلی طراحی شده، قطعه پیش‌فرم به‌روش اکستروژن ساخته خواهد شد.



شکل (۱۰): قالب‌های ساخته شده.

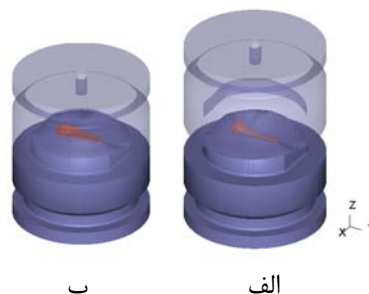
جدول (۱): خواص فیزیکی - حرارتی آلیاژ Ti-6Al-4V [۶].

۰/۰۲	ضریب انتقال حرارت به محیط (N/(s.mm°C))
۰/۰۱۳۱T + ۶/۴۵	رسانایی حرارتی (N/(s°C))
$۲/۳۶ + ۳ \times ۱۰^{-۶} T + ۲ \times ۱۰^{-۶} T^2$	ظرفیت گرمایی (N/(mm ² °C))
۰/۷	ضریب تشعشع

برای تحلیل مرحله فورج پره، با توجه به اینکه فرایند در دمای بالا انجام می‌شود و تغییر شکل‌ها زیاد است، قالب‌ها به‌صورت صلب در نظر گرفته شد. برای رفتار مکانیکی آلیاژ از مدل پرسد و همکارانش (بخش ۲-۱) استفاده شد و ضریب اصطکاک برشی ۰/۶ لحاظ شد (بخش ۲-۲). دمای قطعه‌کار در کوره ۹۶۰°C و دمای قالب‌ها ۱۷۴°C اعمال شد. با توجه به تجهیزات موجود، سرعت حرکت قالب بالایی به‌سمت قالب پایینی ۵۰۰ mm/s در نظر گرفته شد و ضریب انتقال حرارت بین قالب و قطعه‌کار ۵ N/(s.mm°C) [۶] اعمال شد. توزیع درجه حرارت ناشی از مرحله انتقال پیش‌فرم از کوره به قالب به‌عنوان درجه حرارت اولیه پیش‌فرم برای تحلیل فرایند فورج لحاظ شد. مدل المان محدود فرایند فورج در شروع و انتهای عملیات فورج در شکل ۸ نشان داده شده است و روند تغییر شکل و جریان مواد از قطعه پیش‌فرم تا شکل نهایی در شکل ۹ نشان داده شده است.

۳- اجرای عملی فرایند

تجهیزات اصلی لازم برای اجرای فرایند فورج داغ پره شامل پیش‌فرم، قالب، پرس و کوره است. برای جنس قالب‌ها از فولاد گرم‌کار H۱۳ استفاده شد. این جنس با توجه به دارا بودن استحکام بالا طبق تجارب موجود، برای فورج آلیاژ تیتانیوم مناسب است.



شکل (۸): مدل المان محدود فرایند فورج پره (الف) شروع عملیات (ب) انتهای عملیات.

1- Coordinate Measuring Machine

عملی فرایند هم با استفاده از حرارت‌سنج لیزری دمای پیش‌فرم هنگام قرار گرفتن بر روی قالب پایینی اندازه‌گیری شد که تقریباً مساوی مقدار حاصل از شبیه‌سازی بود. با شبیه‌سازی فرایند فورج پره، قطعه حاصل از فورج به صورت شکل ۹ به دست آمد.



شکل (۱۱): پیش‌فرم ساخته شده.

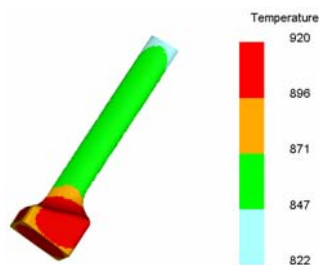


شکل (۱۲): موقعیت کوره و پرس هنگام عملیات فورج.



شکل (۱۳): عملیات پیش‌گرم قالب‌ها و اندازه‌گیری

دمای قالب‌ها با حرارت‌سنج لیزری.



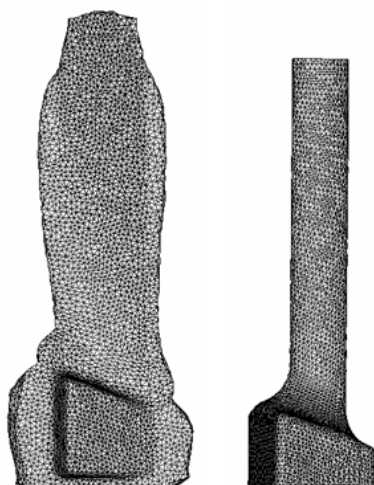
شکل (۱۴): توزیع دما در پیش‌فرم.

این تحقیق چون بر روی فرایند فورج پره متمرکز شده است، قطعه پیش‌فرم به‌روش ماشین‌کاری ساخته شده است. برای گرم کردن پیش‌فرم از کوره‌ای مقاوم‌تری ساخت شرکت اکسایتون استفاده شد. کوره دارای شوک‌پذیری حرارتی بالا بوده و دارای یک کنترلر PID با دقت تثبیت درجه حرارت تا $\pm 2^{\circ}\text{C}$ است. بنابراین کوره توانایی گرم کردن پیش‌فرم به صورت یکنواخت و با دقت زمانی و مکانی نسبتاً بالا دارد. کوره مطابق شکل ۱۲ با فاصله کمی در کنار یک پرس پیچی ۴۳۰ تنی ساخت شرکت Siempelkamp که متعلق به شرکت فورج البرز است، قرار داده شد. برای پیش‌گرم کردن قالب‌ها از مشعل گازی استفاده شد و برای اندازه‌گیری دمای قالب‌ها و پیش‌فرم، یک حرارت‌سنج لیزری مدل TIR8858 ساخت شرکت TERMINATOR مطابق شکل ۱۳ به کار گرفته شد. ابتدا قالب‌ها بر روی دستگاه پرس نصب شدند و موقعیت‌گیری مناسب قالب‌ها به‌ویژه موازی بودن سطح دو قالب کنترل شد. سپس پیش‌فرم‌ها در داخل کوره بارگذاری شدند و دمای کوره برای 960°C تنظیم شد. بعد از رسیدن دمای کوره به 960°C ، نمونه‌ها به مدت حداقل ۱۵ دقیقه در داخل کوره نگه داشته شدند تا دمای نمونه به‌طور یکنواخت به 960°C برسد. هم‌زمان قالب‌ها با استفاده از یک مشعل گازی حرارت‌دهی شدند. طوری که قالب‌ها بالای 170°C گرم شدند. سپس قالب‌ها با استفاده از مایع گرافیت روان‌کاری شدند. با استفاده از یک گیره که دهانه آن هم به حد کافی گرم شده بود، پیش‌فرم داغ از داخل کوره بر روی قالب پایینی در مدت $6/5$ ثانیه منتقل شد و با حرکت رم پرس عملیات فورج انجام گردید. با بالا آمدن رم پرس، قطعه فورج شده از حفره قالب خارج گردید و در هوا خنک شد. در پایان پره فورج شده با استفاده از دستگاه CMM کنترل ابعادی شد.

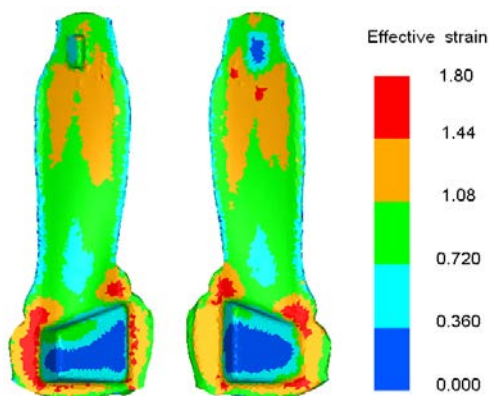
۴- نتایج و بحث

با تحلیل مرحله انتقال پیش‌فرم از کوره به قالب‌ها، توزیع درجه حرارت ناشی از انتقال حرارت به صورت شکل ۱۴ می‌شود. با وجود آنکه دمای قطعه در کوره 960°C درجه بود، به دلیل انتقال حرارت سریع در مدت ۶ ثانیه، دما در قسمت ایرفویل پره تا حدود 870°C درجه افت پیدا می‌کند. در اجرای

قطعه در طول فرایند تقریباً در زیر دمای انتقال است. در شکل ۱۸ تغییرات نیروی فورج در طول فرایند نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مشابه سایر فرایندهای فورج قالب بسته افزایش نیرو ابتدا شیب کم دارد و با جریان مواد و عبور از ناحیه کانال پلیسه، شیب تغییرات نیرو زیاد می‌شود. مشاهده می‌شود که تناز لازم برای اجرای فرایند ۱۷۷ تن است که کمتر از ظرفیت پرس استفاده شده برای اجرای عملی فرایند است.



شکل (۱۵): مش‌بندی قطعه در الف) ابتدا و ب) انتهای تحلیل فرایند فورج.

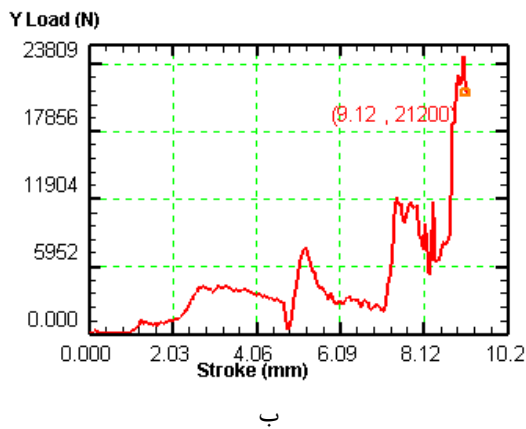
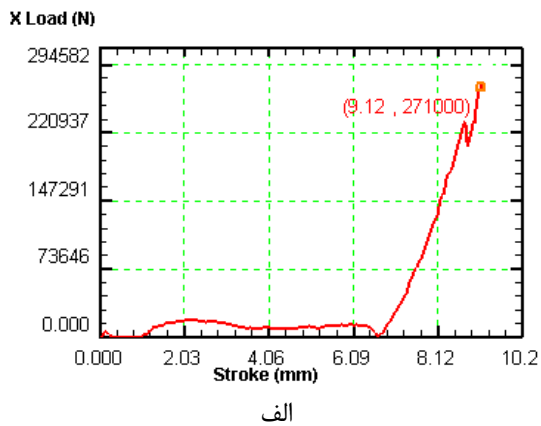


شکل (۱۶): توزیع کرنش در دو سمت پره فورج شده.

مش‌بندی قطعه در ابتدا و انتهای تحلیل فرایند فورج در شکل ۱۵ نشان داده شده است. کرنش مؤثر و توزیع آن نقش مهمی در کیفیت قطعه حاصل از فورج دارد. شکل ۱۶ توزیع کرنش مؤثر را در دو سمت قطعه فورج شده به‌روشنی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین کرنش در قسمت پلیسه و برآمدگی نوک قطعه که جهت موقعیت‌دهی قطعه فورج شده در موقع عملیات ماشین‌کاری ریشه تعبیه شده است، اتفاق می‌افتد. این قسمت بعد از ماشین‌کاری ریشه بریده خواهد شد و مقدار کرنش در آن اهمیتی ندارد، بنابراین بیشترین کرنش در قسمت‌های اصلی پره ۱/۶ است. بررسی پره فورج شده تجربی نشان می‌دهد که ترک در سطح پره مشاهده نمی‌شود، بنابراین کرنش‌ها قابل قبول هستند. همچنین مشاهده می‌شود که در قسمت ایرفویل توزیع کرنش‌ها تقریباً یکنواخت است. هر چقدر کرنش‌ها یکنواخت‌تر باشند، استحکام خستگی قسمت ایرفویل پره که تحت تنش‌های آیرودینامیکی است، بیشتر می‌شود. مقدار درجه حرارت و توزیع آن نقش اساسی در میکروساختار نهایی و همچنین خطاهای ابعادی دارد.

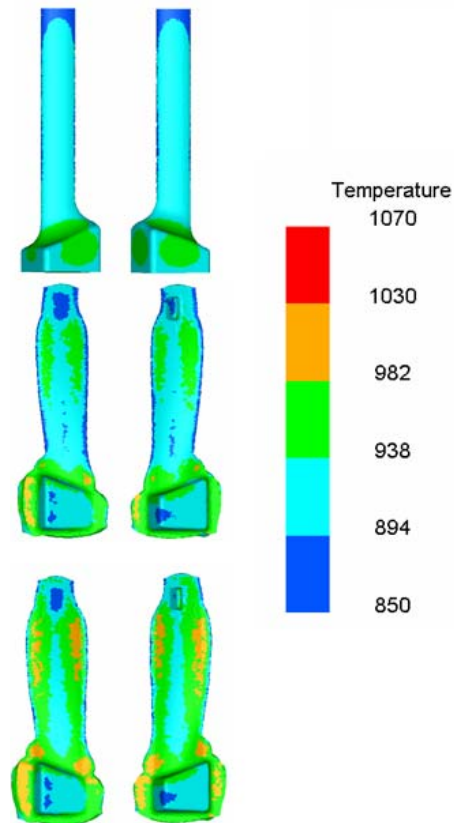
در طی عملیات فورج داغ دو پدیده حرارتی اتفاق می‌افتد. از یک طرف به دلیل اختلاف دمای قطعه با قالب‌ها و محیط، دمای قطعه کار افت پیدا می‌کند و از طرف دیگر به‌خاطر اینکه بخشی از انرژی تغییر شکل به حرارت تبدیل می‌شود، دمای قطعه کار افزایش می‌یابد. در شکل ۱۷ توزیع دمای قطعه کار در دو سمت آن در طول فرایند فورج نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در قسمت ریشه که تغییر شکل‌ها نسبتاً کم است، پدیده افت دما بر افزایش دما غالب شده و دمای ریشه نسبت به حالت اول (شکل ۱۴) کاهش یافته است ولی در قسمت ایرفویل به‌علت غلبه پدیده افزایش دما بر افت دما، دما افزایش یافته است. آلیاژ Ti-6Al-4V دارای دو فاز اصلی α و β است مقدار درصد و شکل این فازها نقش مهمی در کیفیت به‌ویژه استحکام قطعه فورج شده دارد. از آنجا که دمای انتقال (β_1) برای آلیاژ مورد نظر ۹۹۵ درجه سانتیگراد است [۱۹]، یعنی با افزایش دما از این مقدار، تغییر فاز از فاز α به فاز β رخ می‌دهد. برای پره‌های هوایی لازم است که اغلب فرایند در زیر دمای انتقال انجام شود. در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که دمای همه نقاط

راستای طول پره کم است، ولی در راستای عرض آن قابل توجه (۲۷/۱ تن) است. از آنجا که نیروهای جانبی در انحراف قالبها و در نتیجه دقت نهایی قطعه تأثیر زیادی دارند، لازم است که در اجرای عملی فرایند برای مهار آنها تمهیدات لازم اندیشیده شود. به همین خاطر بلوک قالبها مطابق شکل ۶ به صورت نر و ماده در نظر گرفته شدند که مانع انحراف جانبی قالبها می شود.

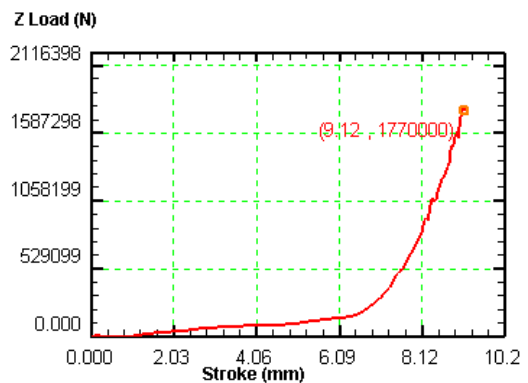


شکل (۱۹): نیروهای جانبی وارد شده به قالب بالایی؛
الف) در جهت عرض پره ب) در جهت طول پره.

با مقایسه پره فورج شده حاصل از شبیه سازی (شکل ۲۰- الف) با شکل قطعه فورج به دست آمده از آزمایش تجربی (شکل ۲۰- ب) مشاهده می شود که از لحاظ شکل ظاهری نتایج تجربی و عددی تطابق خوبی با هم دارند. برای مقایسه دقیق تر، یک مقطع از ریشه و یک مقطع از ایرفویل قطعه فورج شده تجربی با قطعه حاصل از تحلیل عددی در

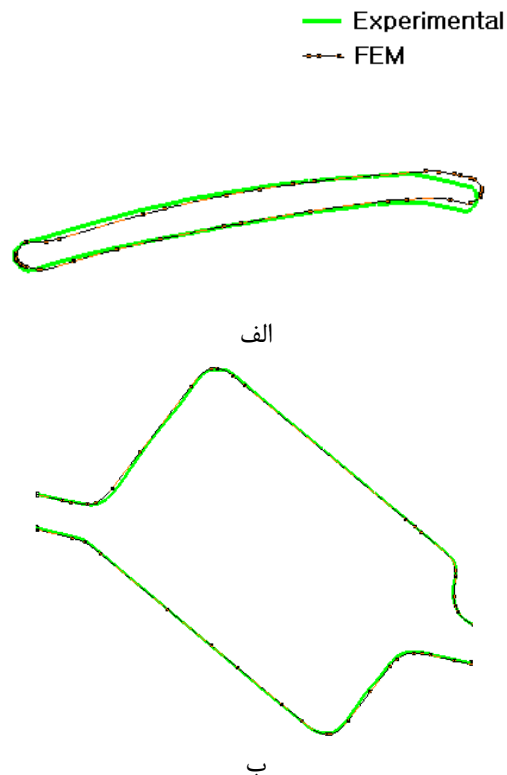


شکل (۱۷): توزیع درجه حرارت در دو سمت قطعه در طول فرایند.



شکل (۱۸): تغییرات نیروی فورج- جابه جایی.

در شکل های ۱۹- الف و ۱۹- ب به ترتیب تغییرات نیروی جانبی در راستای عرض (محور X) و طول (محور Y) نشان داده شده است. مشاهده می شود که نیروی جانبی در



شکل (۲۱): مقطع پره فورج شده؛ الف) ایرفویل ب) ریشه.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرایند فورج داغ یک نوع پره کمپرسور موتور توربین گازی از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به روش المان محدود تحلیل شد و سپس به صورت عملی اجرا شد. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

۱- بررسی مدل‌های رفتار مکانیکی ارائه شده نشان می‌دهد که مدل ارائه شده توسط پرسد و همکارانش نسبت به بقیه مدل‌ها بهترین تطابق را با رفتار مکانیکی ماده استفاده شده دارد،

۲- تحلیل المان محدود فرایند انتقال پیش‌فرم داغ از کوره به قالب نشان می‌دهد که در اثر انتقال حرارت، دمای قسمت ایرفویل از 960°C درجه به حدود 870°C درجه افت پیدا می‌کند که با نتایج تجربی تطابق دارد،

۳- تحلیل المان محدود فرایند فورج پره نشان می‌دهد که توزیع کرنش مؤثر و درجه حرارت در قسمت ایرفویل تقریباً

شکل ۲۱ با هم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نتیجه تجربی حاصل از اندازه‌گیری با CMM تطابق خوبی با نتایج عددی دارد. مقدار اختلاف مربوط به ضخامت در دو سطح قطعه فورج شده در قسمت ایرفویل به سمت نوک پره بیشتر می‌شود، طوری که نزدیک نوک پره حدود 0.2 mm است در حالی که در مقاطع نزدیک ریشه زیر 0.1 mm می‌باشد. یکی از عوامل این تفاوت می‌تواند ناشی از موقعیت‌گیری نامناسب پیش‌فرم در نزدیک نوک ایرفویل باشد. با وجود اینکه شکل ریشه پیش‌فرم طوری طراحی شده است که باعث موقعیت‌گیری بهتر پیش‌فرم می‌شود، ولی در هنگام عملیات فورج پیش‌فرم می‌تواند به مقدار کمی حرکت لغزشی داشته باشد که هرچه به سمت نوک پره نزدیک‌تر می‌شویم، مقدار این لغزش بیشتر می‌شود. علاوه بر این اختلافات جزئی بین دو شکل می‌تواند ناشی از خطای پرس، خطای ساخت قالب‌ها و پیش‌فرم، صرف‌نظر کردن از الاستیک قالب‌ها و جنس قطعه و تغییر شکل‌های ناشی از خنک شدن پره بعد از عملیات فورج باشد که در شبیه‌سازی فرایند از آنها صرف‌نظر شده است.



شکل (۲۰): مقایسه پره فورج شده؛ الف) المان محدود ب) تجربی.

7. Lv, C., Zhang, L., Mu, Z., Tai, Q., and Zheng, Q. "3D FEM Simulation of the Multi-stage Forging Process of a Gas Turbine Compressor Blade, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 198, pp. 463-470, 2008.
8. Zhan, M., Liu, Y., and Yang, H. "A 3D Rigid-viscoplastic FEM Simulation of Compressor Blade Isothermal Forging", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 117, pp. 56-61, 2001.
9. Lu, X. and Balendra, R. "Temperature Related Errors on Aerofoil Section of Turbine Blade", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 115, pp. 240-244, 2001.
10. Ou, H., Lan, J., Armstrong, C.G., and Price, M.A. "An FE Simulation and Optimisation Approach for the Forging of Aeroengine Components", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 151, pp. 208-216, 2004.
11. Ou, H., Armstrong, C.G., and Price, M.A. "Die Shape Optimisation in Forging of Aerofoil Sections", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 132, pp. 21-27, 2003.
12. Ou, H. and Armstrong, C.G. "Evaluating the Effect of Press and Die Elasticity in Forging of Aerofoil Sections Using Finite Element Simulation", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 42, pp. 856 - 867, 2006.
13. Tao, G., He, Y., and Li, L.Y. "Backward Tracing Simulation of Precision Forging Process for Blade Based on 3D FEM", Trans. Nonferrous Met. SOC. China, Vol. 16, pp. s639-s644, 2006.
14. Tao, G., He, Y., and Yuli, L. "Influence of Dynamic Boundary Conditions on Perform Design for Deformation Uniformity in Backward Simulation", J. Materials Processing Tech., Vol. 197, pp. 255-260, 2008.
15. Shin, T.J., Lee, Y.H., Yeom, J.T., Chung, S.H., Hong, S.S., Shim, I.O., Park, N.K., Lee, C.S., and Hwang, S.M. "Process Optimal Design in Non-isothermal Backward Extrusion of a Titanium Alloy by the Finite Element Method", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol. 194, pp. 3838-3869, 2005.
16. Prasad, Y.V.R.K. and Sasidhara, S. "Hot Working Guide", ASM Int., 1997.
17. Altan, T., Nagaile, G., Shen, G. "Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications", Mazandaran Univ., 2006 (In Persian).
18. Deform3D V5, Manual Help, 2004.
19. SM Handbook, Vol.14, Forming and Forging, 1988.

یکنواخت است و در اثر عملیات فورج، دما در قسمت ایرفویل افزایش و در قسمت ریشه افت پیدا می کند و دمای قطعه از دمای انتقال بیشتر نمی شود. تناژ لازم فرایند ۱۷۷ تن به دست آمد و نیروی جانبی اعمال شده به قالب بالایی در راستای عرض پره قابل توجه است، ولی در طول پره ناچیز می باشد و

۴- مقایسه پره فورج شده تجربی با پره حاصل از تحلیل المان محدود نشان می دهد که شکل پره تجربی تطابق خوبی با پره حاصل از شبیه سازی دارد.

۶- تقدیر و تشکر

از شرکت صنایع هواپیمایی ایران، صنعت ساخت قطعات و موتورهای توربینی به دلیل حمایت مالی و فراهم کردن تجهیزات مورد نیاز انجام این تحقیق قدردانی می شود.

مراجع

1. Ou, H. and Armstrong, C.G. "Die Shape Compensation in Hot Forging of Titanium Aerofoil Sections", J. Mat. Proc. Tech., Vols. 125-126, pp.347-352, 2002.
2. Lu, X. and Balendra, R. "Temperature Related Errors on Aerofoil Section of Turbine Blade", J. Mat. Proc. Tech., Vol.115, pp. 240-244, 2001.
3. Bariani, P.F., Bruschi, S., and Negro, T.D. "Integrating Physical and Numerical Simulation Techniques to Design the Hot Forging Process of Stainless Steel Turbine Blades", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 44, pp. 945-951, 2004.
4. Brooks, J.W., Dean, T.A., Hu, Z.M., and Wey, E. "Three-dimensional Finite Element Modelling of a Titanium Aluminide Aerofoil Forging", J. Mat. Proc.Tech., Vols. 80-81, pp. 149-155,1998.
5. 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. Mat. Proc. Tech., Vol. 88, pp. 251-265, 1999.
6. Hu, Z.M. and Dean, T.A. "Aspects of Forging of Titanium Alloys and the Production of Blade Forms", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 111, pp. 10-19, 2001.