

شبیه‌سازی به روش المان محدود عملیات فورج شعاعی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ جهت استخراج نیروهای فورج

محمد شاهرخ اصفهانی^{۱*}، اعظم قاسمی^۲، مهرا مرادی^۳

۱ و * - محمد شاهرخ اصفهانی: دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه مهندسی مکانیک، اصفهان، ایران،
Mohammad.sh1364@yahoo.com

۲ - استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه مهندسی مکانیک، اصفهان، ایران، a_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir

۳ - استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه مهندسی مکانیک، اصفهان، ایران، moradi@cc.iut.ac.ir

چکیده

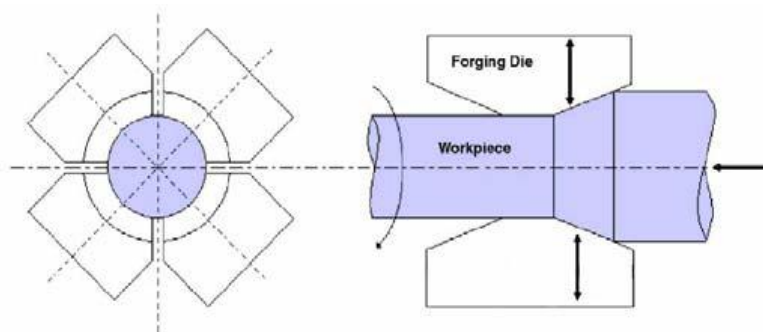
سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به دلیل استحکام بالا در دماهای بالا و مقاوم به خوردگی یکی از آلیاژهای پرکاربرد در صنعت می باشد که البته این خاصیت ها باعث شده، فرم دهی آنها پیچیده تر از دیگر آلیاژها باشد. یکی از روشهای فرم دهی این آلیاژها، فورج شعاعی است که یک نوع فرآیند فورج قالب باز می باشد. در این تحقیق فرآیند فورج شعاعی به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس به منظور پیش بینی نیروهای فورج بصورت سه بعدی شبیه سازی شده است. قطعه کار به صورت یک ماده الاستو-ویسکوپلاستیک مدل سازی شده است. یک ترکیب اصطکاک خشک و تنش برشی محدود شونده جهت تماس قطعه کار و قالبها استفاده شده است. در این تحقیق نیروی لازم جهت انجام فرآیند در هر پاس، تغییرات دما در حین فرآیند و اثر دما بر مقدار نیروی فورج مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نیروهای بدست آمده از شبیه سازی با نتایج تست تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است که تطابق خوبی را بین نتایج عملی و شبیه سازی نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با افزایش دمای اولیه قطعه کار، نیروی فورج کاهش یافته، همچنین در فرآیند فورج شعاعی با کاهش سرعت پیشروی قطعه کار و افزایش تعداد مراحل فورج، نیروی لازم جهت انجام فرآیند کاهش می یابد.

واژگان کلیدی: فورج شعاعی، المان محدود، آلیاژ اینکونل ۷۱۸، نیروی فورج، فورج قالب باز

۱- مقدمه

فرآیند آهنگری شعاعی یک از انواع فرآیندهای فورج قالب باز می باشد، که جهت تبدیل قطعه کار اولیه به قطعه کار نهایی با سطح مقطعهای مربع، مستطیل، مخروطی و شافت های پله دار از دو یا تعداد بیشتری سندان و یا قالب استفاده می شود. این فرآیند می تواند بصورت گرم یا سرد بر روی فلزاتی نظیر فولادهای ساختمانی، فولادهای پر آلیاژ و آلیاژهای مقاوم به حرارت (پایه نیکل و کبالت) انجام شود. خواص محصولات بدست آمده از این فرآیند عبارتند از تیرانس دقیق، کیفیت سطح خوب، افزایش استحکام محصول، ساختار یکنواخت دانه ها و سیکل زمانی کوتاه مدت جهت تولید محصول [۱].

طرح اولیه‌ی آهنگری شعاعی، اولین بار در سال ۱۹۴۶ در کشور استرالیا ایجاد شد. نخستین موارد استفاده آهنگری شعاعی برای فورج قطعات کوچک بصورت داغ و فورج سیلندر بصورت سرد بوده است. آهنگری شعاعی در حال حاضر جهت کاهش قطر شمش‌های ریخته شده، شمش‌های پیش فورج شده، ساخت محور و شافت‌های پله‌دار و آهنگری سیلندرها با پروفیل داخلی متفاوت استفاده می‌شود. شکل ۱ اصول فرآیند فورج یک قطعه کار توسط ماشین آهنگری شعاعی چهار چکش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: اصول ماشین فورج شعاعی چهار چکشه

آقای لورنس^۱ و همکارانش [۲]، در سال ۱۹۹۲ فرآیند فورج شعاعی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را به منظور بررسی کرنش‌ها شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد که کرنش اعمالی به سطح نمونه به مراتب بیشتر از کرنش مرکز قطعه کار می‌باشد. آقای اتوهارر^۲ و همکارانش [۳]، فرآیند فورج شعاعی را برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ جهت بررسی تغییرات دما، اندازه دانه در سه دمای اولیه ۱۰۵۰، ۱۰۱۰، ۹۷۰ درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی کردند. آقای فووده^۳ و همکارانش [۴]، فرآیند فورج شعاعی داغ را بمنظور بررسی اثر پارامترهای موثر بر روی نیروی فورج شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع و ضریب اصطکاک، نیروی فورج بصورت غیر خطی افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش زاویه ورودی قالب و کاهش نرخ تغذیه پیشروی، نیروی مورد نیاز فورج کاهش می‌یابد. آقای خیاط زاده^۴ و همکارانش [۵]، در سال ۲۰۰۸ فرآیند فورج شعاعی را برای محصولات سیلندر توپر و توخالی جهت بررسی توزیع دما، توزیع کرنش پلاستیک شبیه‌سازی سه بعدی کردند. آقای قائی^۵ و همکارانش [۶]، در سال ۲۰۰۶ فرآیند فورج شعاعی را جهت بررسی اثر شکل و زاویه‌های قالب بر روی تنش و کرنش بصورت سه بعدی شبیه‌سازی کردند.

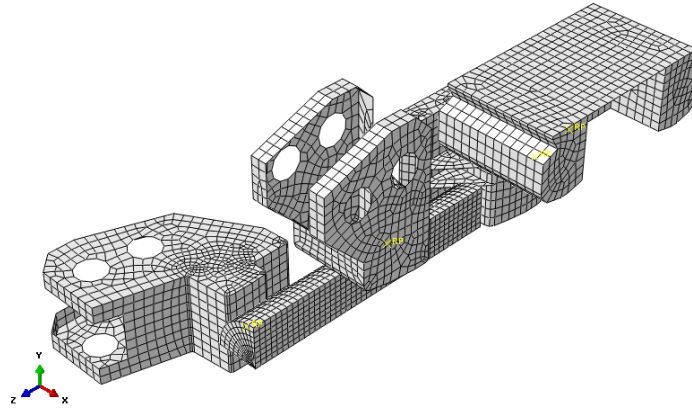
در این تحقیق آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در چهار مرحله توسط دستگاه آهنگری شعاعی SX 55 فورج می‌گردد. هدف از این تحقیق، پیش‌بینی نیروی مورد نیاز برای فورج سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و بررسی امکان تولید این محصول با دستگاه مورد نظر می‌باشد. در نهایت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج عملی مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی فرآیند فورج شعاعی

فرآیند فورج شعاعی از جمله فرآیندهایی می‌باشد که تحت تنش‌های حرارتی و تنش‌های تغییر شکل قرار دارند. در این تحقیق برای پیش‌بینی نیروهای مورد نیاز فورج از آنالیز کوپل حررات به همراه جابجایی استفاده شده است، همچنین تعدادی از پارامترها از جمله: سرعت پیشروی قطعه کار، ماکزیمم سرعت قالب و شکل هندسی قالبها ثابت در نظر گرفت شده است.

1- Laurence
2- Otoo Harrer
3- Foode
4- Khayatzaeh
5- Ghaei

در این شبیه سازی به منظور کاهش زمان تحلیل، قطعه کار بصورت ¼ مدل شده است، در نتیجه نیروهای بدست آمده از واکنش قالبها را باید ۲ برابر در نظر گرفت. در این تحقیق به منظور مدل سازی فرآیند فورج شعاعی و تعیین اثر حرارت بر روی نیروهای فورج از نرم افزار تجاری المان محدود آباکوس استفاده شده است. در شکل ۲ مدل المان محدود برای شبیه سازی فرآیند آهنگری شعاعی چهارچکشه نشان داده شده است.



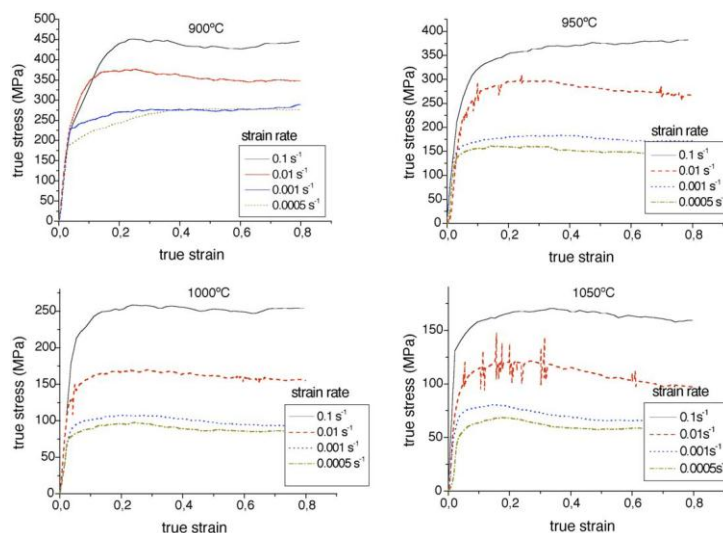
شکل ۲: مدل المان محدود فرآیند فورج شعاعی چهارچکشه

جهت تعیین تماس قالبها و قطعه کار از ترکیب اصطکاک خشک و تنش برشی محدود شونده استفاده شده است. در فرآیندهای شکل دهی داغ، ضریب اصطکاک کولمب یا خشک، برابر ۰/۸ در نظر گرفته می شود و تنش برشی محدود شونده از رابطه شماره ۱ محاسبه می گردد.

$$\tau = m\sigma^{-}/\sqrt{3} \quad (1)$$

در این رابطه σ^{-} میانگین تنش جریان و m ثابت اصطکاک است، که معمولاً برای فرآیندهای سرد ۰/۱۵ [۷] و برای فرآیندهای داغ ۱ منظور می شود [۸]. آنالیز فرآیندهای شکل دهی داغ به تعدادی پارامتر نظیر شکل اولیه قطعه کار و قالب، نرخ کرنش، دما، اصطکاک و ... وابسته می باشد.

در این تحقیق رفتار ماده جهت شبیه سازی با استفاده از تست دیلاتومتر که یک نوع تست فشاری داغ می باشد، در دماها و نرخ کرنشهای مختلف تعیین می گردد. آزمایشات انجام شده در دماهای ۹۰۰، ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد با نرخ کرنشهای 0.1 sec^{-1} - 0.01 sec^{-1} - 0.001 sec^{-1} - 0.0005 sec^{-1} در شکل ۳ نمایش داده شده است. [۹]



شکل ۳: نمایش رفتار الاستو-ویسکو پلاستیک اینکونل ۷۱۸ در فرآیند شکل دهی داغ [۹]

در هر مرحله از فورج، انتقال حرارت تشعشع با ضریب 0.8 ، انتقال حرارت همرفت با ضریب $11(W/M^2K)$ و انتقال حرارت هدایت در زمان تغییر شکل اتفاق می افتد. همچنین، جهت انجام شبیه سازی مورد نظر، در هنگام فورج، انتقال حرارت هدایت تماسی بین تمامی اجزاء از جمله قالبها، قطعه کار و بازوی مکانیکی در نظر گرفته شده است. حرکت چرخشی و حرکت قطعه کار در جهت طولی توسط دو بازوی مکانیکی که در دو طرف دستگاه نصب شده، انجام می شود.

در محاسبات، مدت زمان خروج قطعه کار از کوره تا دستگاه، 50 ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین، ضریب انتقال حرارت بین قالبها و قطعه کار، $9000(w/m^2k)$ و ضریب هدایت بین بازوهای مکانیکی و قطعه کار $3000(w/m^2k)$ لحاظ گردیده شد. اطلاعات اصلی دستگاه و قطعه کار در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: اطلاعات اصلی دستگاه آهنگری شعاعی SX55 و قطعه کار

Inconel 718	ماده
1200 TON (12MN)	نیرو به ازای هر قالب
4	تعداد قالبها
1120 °c	دمای اولیه قطعه کار
350 °c	دمای اولیه قالبها
400 °c	دمای اولیه بازوی مکانیکی
200 l/min	تعداد ضربه قالبها
2 m/min	سرعت پیشروی دستگاه

حرکت قالبها بصورت یک تابع هارمونیک توسط یک مکانیزم لنگ با شعاع لنگ 19 میلی متر انجام می شود. دستگاههای آهنگری شعاعی، با توجه به ابعاد و ظرفیت تناژ دستگاه تقسیم می گردند. دستگاه مورد نظر در این تحقیق دستگاه SX55 با ظرفیت تناژ 1200 تن به ازای هر چکش یا قالب می باشد. شکل ۴ دستگاه آهنگری شعاعی SX55 را نشان می دهد.



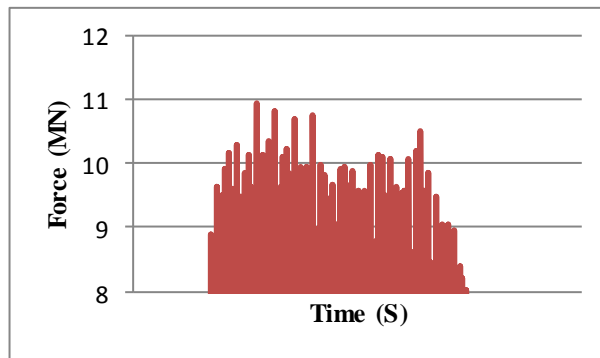
شکل ۴: نمایش دستگاه فورج شعاعی SX 55

نتایج

همانطور که اشاره شد، در این طرح انجام پذیری فرآیند با شرایط ذکر شده مورد تحقیق است، بر این اساس لازم است تا پارامترهای تاثیر گذار در فرآیند استخراج شده و مورد بررسی قرار گیرد.

اثر دمای اولیه قطعه کار بر روی نیروی فورج

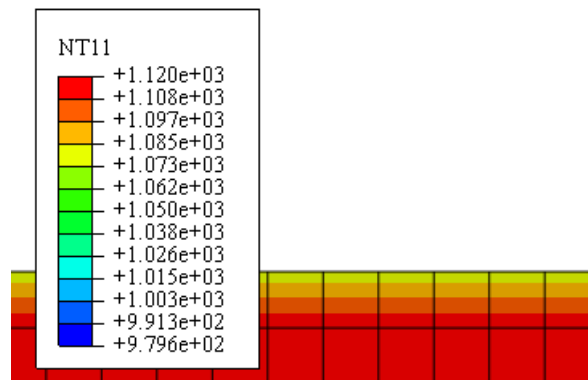
دمای اولیه قطعه کار یکی از مهمترین پارامترهای موثر در نیروی مورد نیاز فورج و تامین خواص مکانیکی محصول مورد نظر می باشد. در این تحقیق فرآیند آهنگری شعاعی با چهار دمای اولیه 1020 ، 1080 ، 1120 و 980 درجه سانتی گراد در پاس اول شبیه سازی شده که بهترین دما با توجه به شرایط ذکر شده، دمای 1120 درجه سانتی گراد بوده است. همانطور که از شکل ۵ مشاهده می کنید ماکزیمم نیرو در دمای اولیه 1120 درجه سانتی گراد برابر $10.8MN$ بوده که این مقدار نیرو در محدوده تناژ دستگاه مورد نظر می باشد.



شکل ۵: نیروی لازم برای انجام فرآیند از طریق شبیه‌سازی در دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد

بررسی دما و تغییرات آن در حین فرآیند

در این فرآیند لازم است تا دما همواره در یک محدوده‌ی مشخص کنترل شود. افزایش دما منجر به تغییرات متالورژیکی و کاهش خواص مکانیکی، همچنین انتخاب دما کمتر از دمای مجاز باعث کاهش کارپذیری و افزایش نیرو می‌شود. این محدوده دمایی بین دمای ۹۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تا نقطه‌ی ذوب موضعی قرار دارد، پس لازم است همواره دمای هر نقطه از شمش در این محدوده قرار داشته باشد. همانگونه که قبلاً اشاره گردید مدت زمان انتقال قطعه کار از کوره تا دستگاه ۵۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این مدت قطعه کار بطور آزادانه انتقال حرارت تابشی و همرفتی با محیط اطراف انجام می‌دهد. شکل شماره ۶ کانتور دما پس از گذشت زمان ۵۰ ثانیه را نشان می‌دهد.

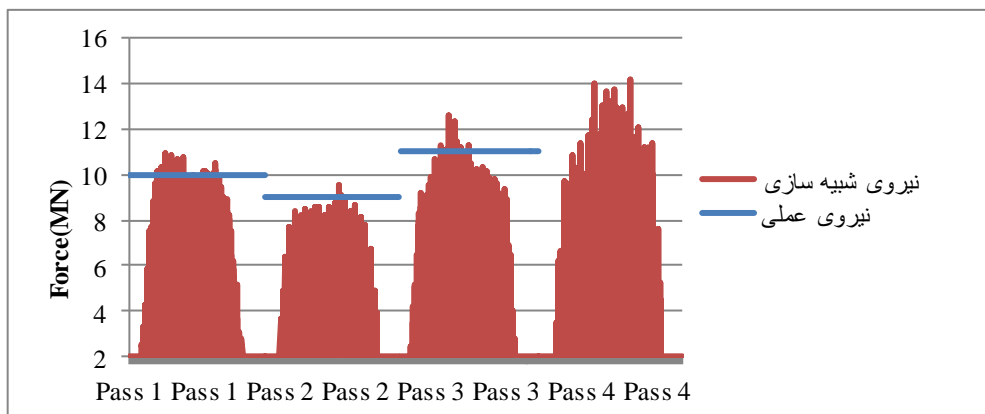


شکل ۶: نمایش کانتور دمای قطعه کار پس از گذشت ۵۰ ثانیه

همانطور که از شکل مشخص است، دمای سطح قطعه کار در شبیه‌سازی بین ۱۰۶۲ تا ۱۰۷۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. پس از انجام فرآیند بصورت عملی، دمای اندازه‌گیری شده قبل از فورج برابر با ۱۰۶۰ درجه سانتی‌گراد بوده که تطابق خوبی را با نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

نیروی لازم برای انجام فرآیند

برای بررسی امکان تولید عملی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸، باید نیروهای به دست آمده از شبیه‌سازی، از نیروهای قابل اعمال توسط دستگاه کمتر باشد. برای این منظور، نیروهای مراحل مختلف فرآیند آهنگری شعاعی توسط نرم افزار استخراج شده و همراه با نیروهای بدست آمده از آزمایش عملی در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نیروها به صورت پالس‌هایی نشان داده شده‌اند. هر پالس با اولین تماس چکش با قطعه شروع و با جدا شدن از قطعه به پایان می‌رسد، با توجه به این که دستگاه در هر دقیقه دویست ضربه به قطعه کار می‌زند، در هر دقیقه دویست پالس برای نیرو ثبت می‌شود.



شکل ۷: نیروی لازم برای انجام فرآیند از طریق شبیه سازی و عملی

در پاس چهارم نیروی بدست آمده از شبیه سازی برابر با ۱۴۰۰ تن بود که در واقعیت در پاس چهارم به علت بالارفتن نیروها در حد بیشتر از ظرفیت دستگاه، باعث توقف دستگاه گردید. در سایر مراحل شبیه سازی همان طور که از شکل مشاهده می شود نیروی محاسبه شده با استفاده از نرم افزار تطابق بسیار مناسبی با مقدار واقعی آن دارد.

نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که با افزایش دمای اولیه ی قطعه کار و همچنین حفظ دما در محدوده کارگرم، نیروی وارده به دستگاه کاهش می یابد. همچنین نتایج به دست آمده از انجام شبیه سازی و عملی نشان می دهد که بزرگی نیروی محاسبه شده در مرحله سوم به حد نهائی دستگاه نزدیک می باشد و احتمال قطع شدن فرآیند وجود دارد، در عمل طبق پیش بینی شبیه سازی در پاس چهارم دستگاه متوقف گردید و توصیه می گردد در پاس سوم و چهارم، مقدار کاهش سطح مقطع و یا مقدار پیشروی قطعه، کمتر در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که دستگاه SX برای حرکت بدون بار خود حدود ۴/۵ تا ۵ مگا نیوتن نیرو مصرف می کند. این مقدار نیرو صرف شتاب دادن چکشها، شافت خارج از مرکز و دیگر قطعات ارتباطی میان موتور و چکشها می باشد، بر همین اساس به نیروهای محاسبه شده توسط نرم افزار این مقدار افزوده شده است.

منابع و مراجع

- [1] G.D.Lahoti, and T. Altan,(1974). Analysis and optimization of the radial forging process for gun barrels, U.S. Army Report, p.12.
- [2] Laurence A.,Jackman M.S.,Ramesh and Robin Forbes Jones,(1992). “ Development Of a Finite Element Model For Radial Forging Of Superalloys ”The minerals, Metals & Materials Society,pp.103-113.
- [3] Harrer O.,Wallner S.,Wieser V.,Sommitsch C. (2006) . “ Radial forging of a nickel base alloy at different temperatures.”steel grips 4NO.5. PP.340-344.
- [4] Foode P.,Poursina M., Fadaei Tehrani A. “A parametric study on a hot radial forging force”.
- [5] Khayatzadeh S.,Poursina M.,Golestanian H.(2006). “ A simulation of hollow and solid products in multi-pass hot radial forging using 3D-FEM Method” .int mater Form,pp. 371-374.
- [6] Ghaei A.,Movahhedy M.R.,(2007).“ Die design for the radial forging process using 3D FEM ” Journal of Material Processing Technology 182.pp.534-539.
- [7] G.D. Lahoti, T. Altan,(1976).“Analysis of the radial forging process for manufacturing of rods and tubes”, ASME J. Eng. Ind. 98 PP. 265–271.
- [8] Joseph P.,Domblesky., Rajiv Shivpuri.(1995). “Development and validation of a finite element model for multiple-pass radial forging”. Journal of Material Processing Technology 55.P.433.
- [9] Thomas.A.,Wahabi M.El.,Cabrera J.M., Prado J.M.,(2006). “High temperature deformation of INCONEL 718 ” journal of Material processing technology 177.p.471.