



طراحی پیش فرم بهینه در آهنگری قطعات پیچیده با استفاده از روش خطوط هم‌پتانسیل

سعید آقازاده¹، محمد حسین پور گللو^{2*}، سیدمحمدحسین سیدکاشی³، بابک باروقی بناب⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۳۶-۱۶۷۸۵، m.hoseinpour@srctu.edu

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 تیر 1394

پذیرش: 29 تیر 1394

ارائه در سایت: 05 اسفند 1394

کلید واژگان:

پیش فرم

آهنگری

روش خطوط هم‌پتانسیل

طراحی آزمایش

شبیه‌سازی اجزای محدود

طراحی پیش فرم مناسب با توجه پیچیدگی فرم هندسی قطعات و بیشترین کرنش قابل اعمال مجاز به قطعه، می‌تواند باعث پر شدن کامل قالب، کاهش نیروهای آهنگری، افزایش عمر قالب و بهبود کیفیت قطعه تولیدی شود. در این مقاله طراحی پیش فرم برای قطعه نامتقارن فولادی بلند، با استفاده از روش خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی و روش توزیع جرمی صورت گرفته و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند با آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. اختلاف پتانسیل الکتریکی بین لقمه اولیه و فرم نهایی ایجاد شده و خطوط هم‌پتانسیل بین آن‌ها به کمک نرم‌افزار آباکوس استخراج شده است. در ادامه با انجام طراحی آزمایش و تحلیل در نرم‌افزار دفرم 3D با در نظر گرفتن کمترین میزان نیروی لازم برای شکل دهی و واریانس تنش و کرنش، بهترین پیش فرم از میان پیش فرم‌های موجود انتخاب شده است. در نهایت قالب آهنگری بسته مربوط به پیش فرم طراحی شده به کمک روش خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. برای اثبات کارآمدی پیش فرم به دست آمده، مقایسه‌ای بین روش توزیع جرمی و روش خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی انجام گرفت که نتایج به دست آمده نشان دهنده یکنواختی 45 درصدی توزیع کرنش، کاهش 12 درصدی نیروی آهنگری و کاهش 137 گرمی دورریز مواد اولیه بوده است.

Optimal preform design in forging of complex parts using equipotential lines method

Saeed Aghazadeh¹, Mohammad Hoseinpour Gollo^{1*}, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi², Babak Baroughi Bonab¹

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

* P.O.B. 16785-1363, Tehran, Iran, m.hoseinpour@srctu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 29 June 2015

Accepted 20 July 2015

Available Online 24 February 2016

Keywords:

Preform

Equipotential lines method

Design of experiments

Finite element simulation

ABSTRACT

Design of appropriate preform while considering geometry complication and maximum allowable strain into part, may result in appropriate die filling, forging load reduction, increasing tool life, and improving the material property of manufactured part. In this paper, preform design for long and asymmetrical steel parts using equipotential lines and mass distribution methods is performed. Then the results of the finite element simulations have been compared with the experimental tests. The electric potential difference generated between billet and final part, and equipotential lines between them are extracted using ABAQUS software. After design of experiments, and analysis in the DEFORM-3D software, while keeping the necessary force of forming and variance of stress and strain to minimum, the best preform has been selected among other preforms. Finally, forging die is manufactured and tested based on the designed preform using equipotential lines method. For the purpose of performance verification, comparison between equipotential lines and traditional mass distribution methods has been performed, where the results showed %45 uniformity in strain distribution, %12 reduction in forging loads and 137 grams saving in initial raw material.

1- مقدمه

پیش فرم طراحی نمود [1]. طراحی پیش فرم مهم‌ترین جنبه پژوهش و توسعه فرایند آهنگری است. بیشتر طراحی قالب‌های پیش فرم به کمک سعی و خطا یا روش‌های سنتی مانند روش توزیع جرمی انجام می‌شود که زمان‌بر، پرهزینه و نیازمند استفاده از تجربیات افراد خبره بوده و لزوماً منجر به تولید پیش فرم بهینه نخواهد شد. طراحی قالب‌های پیش فرم با اهداف پر شدن کامل قالب، دانه‌بندی مناسب، افزایش عمر قالب، و کاهش دورریز مواد

آهنگری، فرایند شکل‌دهی توده‌ای از فلز تحت فشار یا ضربه به‌منظور تولید قطعه با شکل هندسی و خواص مطلوب است. کم کردن دورریز ماده مصرفی و کاهش زمان تولید یکی از اهداف اصلی در طراحی این فرایند برای اقتصادی‌تر شدن فرایند است. با توجه به اینکه تولید قطعات پیچیده در یک مرحله آهنگری امکان‌پذیر نیست باید در یک یا چند مرحله برای قطعه

Please cite this article using:

S. Aghazadeh, M. Hoseinpour Gollo, S.M.H. Seyedkashi, B. Baroughi Bonab, Optimal preform design in forging of complex parts using equipotential lines method, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 9-17, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

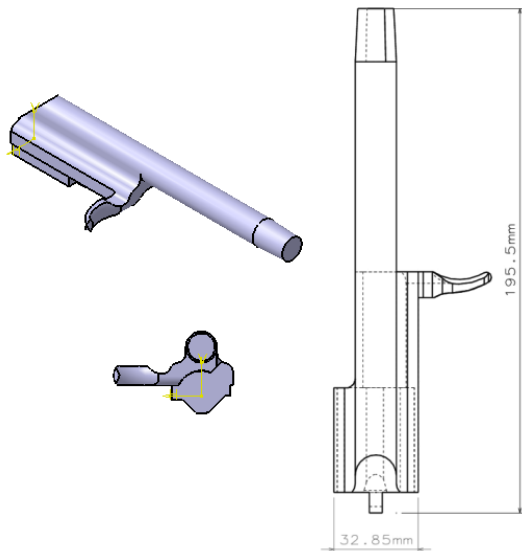


Fig. 1 Studied specimen

شکل 1 قطعه فولادی مورد مطالعه

از طرفی هندسه قطعه‌کار به صورتی است که تولید قطعه با روش ماشین‌کاری دارای دورریز بسیار زیادی خواهد بود و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست، مضافاً اینکه خواص مکانیکی مطلوب نیز با توجه باینکه این قطعه دارای کاربرد ویژه در صنایع خاص است، حاصل نخواهد شد. با توجه به موارد ذکر شده بهترین روش تولید قطعه، روش آهنگری است. در این روش به لقمه اولیه پتانسیل الکتریکی یک‌ولت و به قطعه نهایی پتانسیل الکتریکی صفرولت اختصاص داده می‌شود و خطوط هم‌پتانسیل بین آنها استخراج می‌شود. با انتخاب یکی از این خطوط به عنوان ولتاژ بهینه می‌توان از آن برای طراحی پیش‌فرم استفاده نمود. به‌منظور انتخاب بهینه‌ترین پیش‌فرم از میان پیش‌فرم‌های موجود، از طراحی آزمایش به کمک نرم افزار مینی‌تب³ استفاده شده است. در نهایت پیش‌فرم دیگری به کمک روش توزیع جرمی (روش سنتی) طراحی گردید و نتایج بدست آمده از آن با نتایج بدست آمده از روش خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی مقایسه گردید.

2- تئوری شبیه‌سازی میدان الکترواستاتیک

تئوری مکانیک تغییر شکل فلزات، بر مبنای رفتار متغیرهای میدان مانند تغییرات تنش، کرنش، جابجایی و سرعت هر نقطه از مواد استوار است. در کل، این متغیرها تابع زمان و مختصات نقاط می‌باشند. بنابراین، مطالعه رفتار تغییر شکل پلاستیکی فلز در حقیقت مطالعه قوانین حاکم بر متغیرهای میدان در فضا و زمان، تحت تأثیر میدان‌های انرژی است [8]. حرکت و کرنش مواد در محیط پیوسته به‌وسیله روابط بین مختصات اولیه و مختصات لحظه‌ای نقاط مواد تشریح می‌شود. اگر مختصات لحظه‌ای نقطه‌ای از ماده x_i در زمان t و $x_i + \Delta u_i$ در زمان $t + \Delta t$ باشد، بردار جابجایی این نقطه Δu در زمان Δt خواهد بود. میدان سرعت با استفاده از متغیر اویلر به‌صورت معادله (1) بیان می‌شود:

$$v(x_i, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

اگر مختصاتی که یک نقطه در زمان‌های مختلف دارد به هم متصل گردد، خط حاصل از آن مسیر حرکت آن نقطه خواهد بود. این مسیر می‌تواند به‌صورت تابع پتانسیل ϕ نیز بیان شود. می‌توان مشاهده کرد که جهت مماس

نیروی آهنگری انجام می‌گیرد.

برای اولین بار، لی و همکارانش [2] در سال 2002 تحقیقی بر مبنای تئوری جریان الکتروسیسته جهت طراحی شکل پیش‌فرم آهنگری یک قطعه متقارن محوری انجام دادند. در این روش، بر طبق معیارهای تشابه اگر مدل ریاضی موضوع مورد تحقیق مثلاً میدان مکانیکی، میدان مغناطیسی، یا میدان جریان گرما و غیره، شبیه به مدل ریاضی میدان الکترواستاتیک باشند، می‌توان موضوع فیزیکی مورد نظر را با استفاده از میدان الکترواستاتیکی شبیه‌سازی کرد. یان هوی و همکارانش [3] به طراحی پیش‌فرم دیسک توربین‌های متالورژی پودر با استفاده از روش خطوط هم‌پتانسیل پرداختند. در این تحقیق نشان داده شد که معادله پتانسیل الکتریکی در میدان الکترواستاتیکی بدون بار الکتریکی و معادله تابع پتانسیل سرعت و تابع سیلان در میدان سرعت در طی تغییر شکل مواد، همگی با هم برابر هستند، زیرا بر تمام آن‌ها معادله‌هایی از نوع لاپلاسین حاکم است. انرژی در میدان الکترواستاتیکی و کار پلاستیکی در طی تغییر شکل پلاستیکی مواد، همه از اصول کمترین انرژی تبعیت می‌کنند. در مقایسه با روش سنتی، شکل پیش‌فرم تهیه‌شده با خطوط هم‌پتانسیل هموارتر بوده و برای جریان مواد داخل محفظه‌ی قالب بسیار مناسب‌تر است. بنابراین نیروی مورد نیاز کاهش می‌یابد.

ونگ و لی [4] برای تولید دیسکی از جنس سوپر آلیاژ با استفاده از فرایند آهنگری هم‌دما از روش میدان شبه هم‌پتانسیل استفاده کردند. کای و همکاران [5] روش جدیدی برای طراحی پیش‌فرم بر اساس شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان الکترواستاتیک و تغییر شکل هندسی ارائه کردند. در این روش میدان الکترواستاتیک سه‌بعدی به‌طور مؤثر استفاده و نشان داده شد که ابزار قدرتمندی برای یافتن شکل میانی لقمه اولیه و شکل نهایی است. کار تجربی که بر پایه استفاده از روش میدان الکترواستاتیک انجام شد نشان داد که این روش، روشی بسیار سودمند و کارآمد برای یافتن شکل پیش‌فرم برای کاربردهای عملی است. برای نشان دادن صحت نتایج، دیسک متقارنی شبیه‌سازی شد و نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از این روش باعث بهبود کیفیت قطعه، کاهش نیروها و پر شدن کامل حفره قالب می‌شود. ایشان [6] در ادامه بر اساس شبیه‌سازی میدان الکترواستاتیک سه‌بعدی به طراحی پیش‌فرم قطعات تیتانیومی با ابعاد بزرگ پرداختند. المفادی [7] با استفاده از همین روش شکل پیش‌فرم را برای آهنگری دیسک توربین آلومینیومی بهینه‌سازی نمود. گوان و همکاران [8] نیز این روش را به همراه روش روبه‌پاسخ برای بهینه‌سازی طراحی پیش‌فرم یک قطعه پیچیده متقارن بکار بردند. شیا و همکاران [9] در 2015 از این روش برای طراحی پیش‌فرم چرخ‌دنده‌ها و از جعبه‌ابزار ام‌بی‌سی¹ متلب برای استخراج مدل ریاضی آن استفاده کردند. آن‌ها توانستند با این روش در مقایسه با روش سنتی به 40% کاهش بار و 50.7% افزایش نرخ کارگیری ماده دست یابند. تائو و همکاران [10] با استفاده از این روش و جعبه‌ابزار کیج²، آهنگری باله‌های بزرگ را بهینه‌سازی کردند و از این راه به 45% کاهش ابعاد ریزدانه‌ها و 35% کاهش نیروی آهنگری دست یافتند.

همان‌طور که در ادبیات تحقیق بررسی و نشان داده شد، تاکنون استفاده از این روش برای طراحی و بهینه‌سازی پیش‌فرم قطعات باریک و بلند و نامتقارن استفاده نشده است. شکل 1 نشان دهنده قطعه مورد بررسی در مقاله حاضر است. شرایط کاری این قطعه به‌گونه‌ای است که تحت تأثیر تنش و فرسایش بالایی قرار دارد.

1. MBC toolbox
2. CAGE toolbox

3. Minitab

لقمه اولیه و قطعه نهائی به‌عنوان رسانایی برای اعمال میدان الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور ایجاد میدان الکتریکی، لقمه اولیه به میزان مناسبی بزرگ‌تر در نظر گرفته شده و قطعه نهائی از داخل لقمه اولیه کم می‌شود. این فرایند در شکل 2 قابل‌مشاهده است. موضوعی که باید در نظر داشت این است که برای داشتن توزیع مناسبی از خطوط هم‌پتانسیل، دوسطحی که اختلاف‌پتانسیل دارند نباید یکدیگر را قطع کنند. به این منظور ابعاد لقمه اولیه باید آن‌قدر بزرگ در نظر گرفته شود که بتواند قطعه نهائی را در خود جای دهد. شبیه‌سازی سه‌بعدی الکترواستاتیکی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس 6.1 انجام و مشخصات ماده مطابق جدول 1 تعریف شده است.

شکل 3 توزیع میدان الکتریکی در فاصله بین لقمه اولیه و قطعه نهائی را نشان می‌دهد. در این شکل بی‌نهایت خطوط هم‌پتانسیل قرار دارد که هیچ همپوشانی با یکدیگر ندارند. خطوط هم‌پتانسیل نزدیک به شکل نهائی، پیچیده بوده، اما خطوط نزدیک به لقمه اولیه هموارتر و ساده‌تر هستند.

وظیفه حفره پیش‌فرم، ایجاد شکلی بین لقمه اولیه و فرم نهائی است که بتواند به پر شدن کامل قالب نهائی کمک کند و کرنش مؤثر در قطعه نهائی را کاهش دهد. بنابراین، خطوط هم‌پتانسیل نزدیک‌تر به شکل نهائی، ترجیح داده می‌شود. ضمن اینکه اگر فرم انتخابی خیلی به شکل قالب نهائی نزدیک باشد نمی‌تواند مؤثر واقع شود و در واقع تفاوتی بین پیش‌فرم و فرم نهائی وجود نخواهد داشت. برعکس اگر فرم انتخابی بسیار ساده باشد، پیش‌فرم وظیفه توزیع مناسب در داخل محفظه قالب را از دست می‌دهد. شکل 3 نشان می‌دهد که خطوط هم‌پتانسیل با ولتاژهای مجاور، مثل 0.06 و 0.07، پروفیل‌های مشابهی دارند. طبق اصول فوق و اینکه قطعه مورد مطالعه، نامتقارن، طویل و نسبتاً پیچیده است و با توجه به اینکه خطوط هم‌پتانسیل با ولتاژهای بیشتر از 0.30 ولت خیلی به لقمه اولیه نزدیک هستند، و لذا بنابراین برای پروفیل پیش‌فرم مناسب نمی‌باشند، خطوط هم‌پتانسیل با ولتاژهای 0.06، 0.09، 0.12، 0.15 و 0.30 برای بررسی انتخاب شده است.

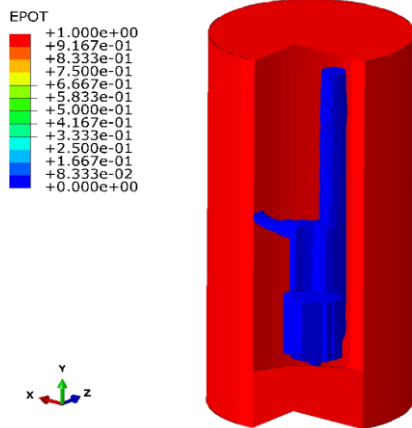


Fig. 2 Applying voltage 0 to the final specimen and voltage 1 to the initial blank

شکل 2 اعمال ولتاژ صفر به قطعه نهائی (حفره داخلی) و ولتاژ یک به لقمه اولیه (شکل بیرونی)

جدول 1 مشخصات ماده

Table 1 Material properties

207	مدول الاستیک (GPa)
0.189	مقاومت الکتریکی (Ω)
477	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
84.1	هدایت حرارتی ($W/m^{\circ}C$)

بر یک نقطه روی خط لغزش با جهت سرعت در این نقطه یکی باشد. بنابراین، میدان سرعت به‌وسیله تابع اسکالر پتانسیل سرعت φ و یا جریان سرعت ψ بیان می‌شود. در فرایند آهنگری داغ، تغییر شکل مواد معمولاً پیوسته و پایدار است و حجم مواد نیز ثابت فرض می‌شود. در کل، فرض می‌شود که میدان سرعت در طول تغییر شکل پلاستیک مواد پیوسته، است و در نواحی اتصال، ساده می‌باشد. میدان سرعت، یک میدان غیر چرخشی است. پس یک پتانسیل سرعت در میدان سرعت وجود دارد و سرعت تغییر شکل (v) ، گرادیان پتانسیل سرعت (φ) است که در معادله (2) آمده است:

$$v = \nabla \varphi = \text{grad } \varphi \quad (2)$$

با فرض اینکه حجم تغییر شکل یافته ثابت باشد، رابطه (3) بدست می‌آید:

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (i = x, y, z) \quad (3)$$

دیورژانس در ناحیه تغییر شکل صفر است:

$$v = \nabla \varphi = \text{grad } \varphi, \quad \text{div}(v) = 0 \quad (4)$$

با جایگذاری معادله (2) در معادله (4) رابطه (5) بدست می‌آید:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (5)$$

معادله (5) معادله لاپلاس است. وقتی تابع پتانسیل سرعت φ برای مقدار ثابت $\varphi = C_1$ نوشته شود، خطوط هم‌پتانسیل میدان اسکالر φ به دست می‌آیند. بنابراین، جهت سرعت در هر نقطه بر خطوط هم‌پتانسیل φ عمود می‌باشد. از راهی مشابه، اصطلاح تابع جریان ψ در میدان سرعت از دو شرط زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{ii} = 0, \quad (i = x, y, z) \quad -$$

$$\text{rot}(v) = 0 \quad -$$

پس می‌توان رابطه (6) را نوشت:

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (6)$$

معادله (6) نیز معادله لاپلاس است. هنگامی که تابع جریان سرعت ψ

برابر مقدار ثابت $\psi = C_2$ قرار داده می‌شود، خطوط کانتور تابع اسکالر ψ به دست می‌آید و می‌توان گفت که خطوط کانتور ψ همان خطوط لغزش است. بنابراین، جهت سرعت در هر نقطه مماس بر خط جریان می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که خطوط هم‌پتانسیل $\varphi = C_1$ و خطوط لغزش $\psi = C_2$ سیستم اورتوگونال منحنی‌ها هستند. در عمل نیز در طول تغییر شکل پلاستیکی مواد، دو گروه خطوط لغزش در میدان خط لغزش وجود دارد.

از تئوری پایه الکترواستاتیک، مقدار پتانسیل φ در یک نقطه در یک میدان الکترواستاتیک شامل چگالی بار الکتریکی است که به‌صورت معادله پواسون (معادله 7) بیان می‌شود:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

که ε_0 ثابت دی‌الکتریک است. اگر هیچ باری در میدان الکترواستاتیک نباشد، معادله حاکم به‌صورت معادله (8)، که معادله لاپلاس است، بیان می‌شود.

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (8)$$

در معادلات (5)، (6) و (8) می‌توان مشاهده نمود که پتانسیل الکتریک φ ، پتانسیل سرعت φ و تابع جریان ψ همه از جنس معادله لاپلاس می‌باشند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که میدان سرعت تغییر شکل مواد از نظر معادلات دیفرانسیل حاکم بر آن شبیه به میدان الکترواستاتیک بدون شارژ است.

3- طراحی پیش‌فرم به روش خطوط هم‌پتانسیل

از آنجا که پیش‌فرم، شکلی بین لقمه اولیه و قطعه نهائی دارد، فضای بین

گرفته و واریانس آن‌ها با معادلات (10-13) محاسبه شده است.

$$\vartheta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon}_{ave})^2 \quad (10)$$

$$\bar{\varepsilon}_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{\varepsilon}_j \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{\sigma}_j \quad (12)$$

$$\omega = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{\sigma}_i - \bar{\sigma}_{avg})^2 \quad (13)$$

که $\bar{\varepsilon}_i$ کرنش مؤثر برای هر المان، $\bar{\varepsilon}_{avg}$ کرنش متوسط برای تمام المان-ها، ϑ واریانس کرنش، $\bar{\sigma}_i$ تنش مؤثر برای هر المان، $\bar{\sigma}_{avg}$ تنش متوسط برای تمام المان‌ها، ω واریانس تنش و N تعداد المان‌ها می‌باشد.

پس از تحلیل 25 حالت جدول 3 و مطالعه آماری داده‌ها می‌توان تأثیر متغیرهای فرایند را بر هر یک از خروجی‌ها مورد بررسی قرار داد. نمودارهای شکل 4 تأثیر متغیرهای فرایند را بر نیروی آهنگری مورد نیاز برای شکل‌دهی نشان می‌دهند.

جدول 2 عوامل طراحی آزمایش

Table 2 DOE parameters

عامل	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4	سطح 5
ولتاژ (شکل)	0.06	0.09	0.12	0.15	0.3
نرخ کرنش	0.03	0.5	1	5	9
اصطکاک	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
دما (°C)	1050	1100	1150	1200	1250

جدول 3 نتایج شبیه‌سازی‌ها

Table 3 Simulation results

شماره	نرخ کرنش	دما	اصطکاک	ولتاژ	بار	واریانس کرنش	واریانس تنش
1	0.03	1050	0.25	0.06	230	0.567	539
2	0.03	1100	0.3	0.09	253	0.56	532
3	0.03	1150	0.35	0.12	251	0.5	531
4	0.03	1200	0.4	0.15	288	0.65	540
5	0.03	1250	0.45	0.3	320	0.623	590
6	0.5	1050	0.3	0.12	243	0.501	540
7	0.5	1100	0.35	0.15	289	0.736	552
8	0.5	1150	0.4	0.3	304	0.701	578
9	0.5	1200	0.45	0.06	248	0.59	538
10	0.5	1250	0.25	0.09	251	0.58	524
11	1	1050	0.35	0.3	301	0.74	593
12	1	1100	0.4	0.06	303	0.45	545
13	1	1150	0.45	0.09	268	0.39	542
14	1	1200	0.25	0.12	243	0.519	528
15	1	1250	0.3	0.15	281	0.716	535
16	5	1050	0.4	0.09	251	0.501	548
17	5	1100	0.45	0.12	263	0.43	565
18	5	1150	0.25	0.15	280	0.784	539
19	5	1200	0.3	0.3	303	0.735	561
20	5	1250	0.35	0.06	241	0.469	523
21	9	1050	0.45	0.15	301	0.642	559
22	9	1100	0.25	0.3	308	0.762	563
23	9	1150	0.3	0.06	236	0.56	529
24	9	1200	0.35	0.09	259	0.5	532
25	9	1250	0.4	0.12	243	0.413	524

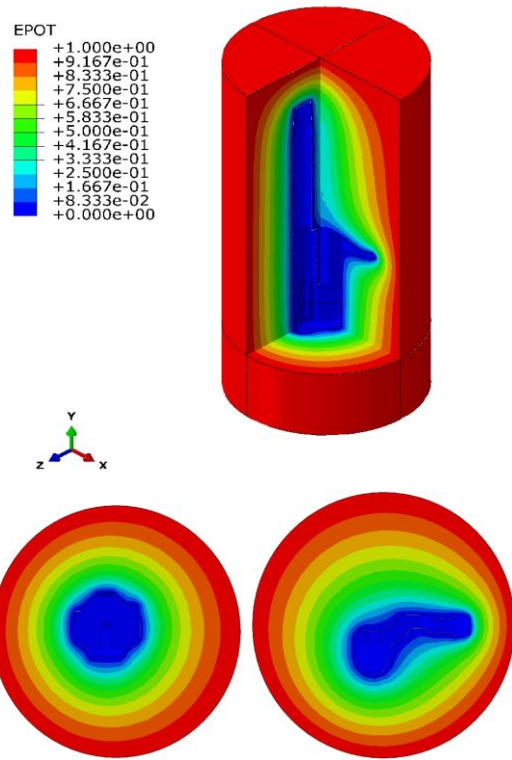


Fig. 3 Distribution of equi-potential lines between the initial and final blank; a) longitudinal section, b) cross section

شکل 3 توزیع خطوط هم‌پتانسیل بین لقمه اولیه و قطعه نهایی؛ (a) مقطع طولی، (b) مقطع جانبی

4- انتخاب فرم بهینه از میان فرم‌های موجود

به منظور انتخاب پیش فرم بهینه از میان پیش فرم‌های موجود، از روش طراحی آزمایش تاگوچی به کمک نرم افزار مینی تب 16 استفاده شده است. تابع مورد استفاده در مدل ریاضی این روش به شکل معادله (9) بوده که به تابع ضرر تاگوچی معروف است.

$$L(Y) = \frac{1}{n}(Y - Y_0)^2 \quad (9)$$

در این معادله $(Y - Y_0)$ نشان‌دهنده انحراف مشخصه کیفی Y از مقدار هدف آن Y_0 است و n مشخص‌کننده تعداد تکرارها است. برای این منظور عوامل مؤثر بر پاسخ‌ها، نرخ کرنش، دمای آهنگری، اصطکاک و ولتاژ (فرم قطعه) فرض شده است.

مطابق جدول 2، طراحی آزمایش برای 4 عامل فوق در 5 سطح انجام گرفته است. برای نرخ کرنش، کمترین نرخ کرنش مربوط به پرس‌های هیدرولیک و بیشترین نرخ کرنش مربوط به چکش‌های سقوطی آهنگری در نظر گرفته شده است.

برای انجام آزمایش‌ها، آرایه استاندارد L25 انتخاب شده که در جدول 3 آمده است. حالت‌های موجود را به کمک نرم افزار دیفرم سه بعدی مورد تحلیل قرار داده و پاسخ‌های زیر به عنوان خروجی مؤثر در طراحی پیش فرم در نظر گرفته می‌شود.

۱- نیروی لازم برای شکل‌دهی

۲- میزان پراکندگی کرنش در قطعه

۳- میزان پراکندگی تنش در قطعه

کرنش و تنش همه المان‌های قطعه در مرحله آخر تحلیل، از نرم افزار دیفرم

داخل قالب نهایی قرار گرفته و شبیه‌سازی می‌شود.

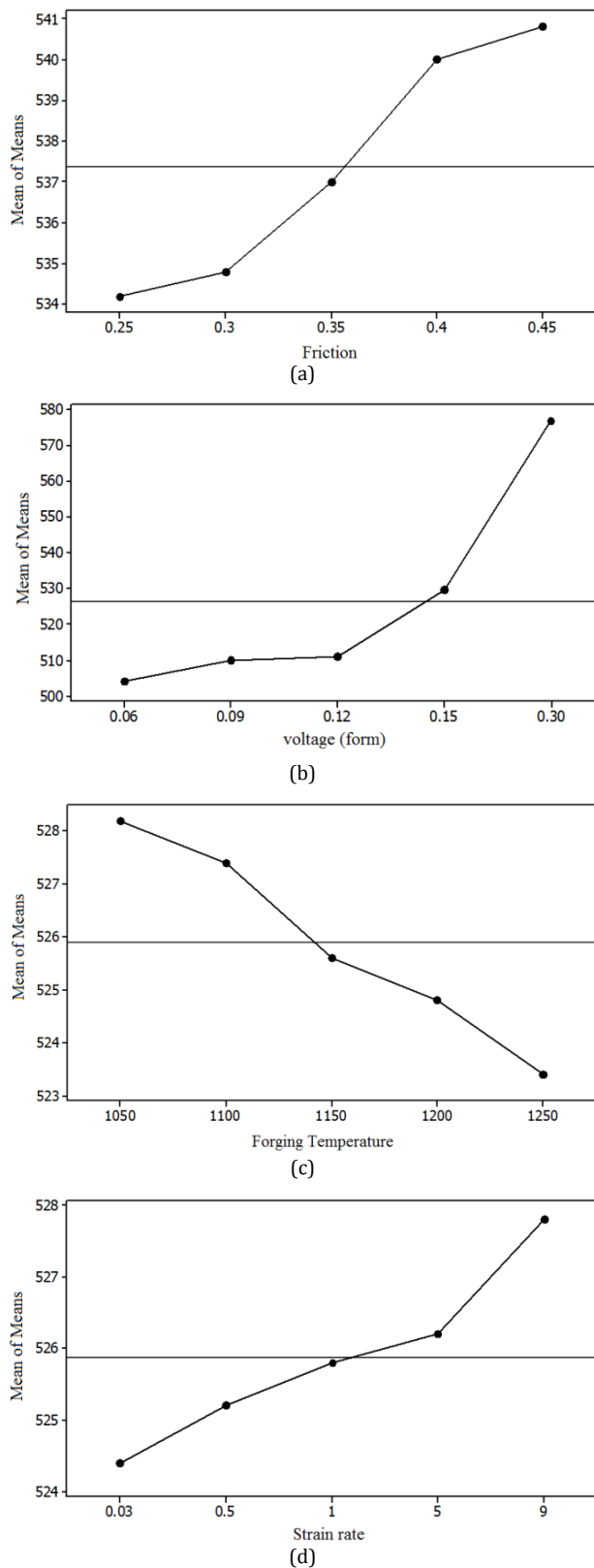


Fig. 4 The effect of process parameters on forging force; a) friction, b) voltage (form), c) temperature, d) strain rate

شکل 4 تأثیر متغیرهای فرایند بر نیروی آهنگری؛ الف) اصطکاک، ب) ولتاژ (فرم)، ج) دما، د) نرخ کرنش

نمودارهای نشان داده شده در شکل 4 برای نتیجه‌گیری قطعی استفاده نمی‌شوند و به‌منظور غلبه بر این مشکل از تحلیل واریانس استفاده می‌شود. نرمال بودن توزیع خطا توسط نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده که در شکل 5 ارائه شده است، بررسی می‌شود. پراکندگی روند توزیع نقاط اطراف خط راست مورب نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع مقادیر باقی‌مانده¹ یا همان خطاهاست. از آن گذشته مقدار آماری AD^2 و مقدار P که مقادیر عددی آزمایش نرمال بودن توزیع را در اختیار می‌گذارند نیز بر روی نمودار آورده شده است. بزرگ‌تر بودن مقدار P از مقدار سطح معناداری α (که در این تحقیق 0.05 در نظر گرفته شده است) نشان می‌دهد که خطا دارای توزیع نرمال می‌باشد.

دو فرض دیگر نیز توسط نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده در شکل 6 بررسی می‌شود. نبود ساختار مشخص در نقاط نمودار، ثابت بودن واریانس و مستقل بودن آن را نشان می‌دهد.

اکنون که صحت فرض‌های بالا اثبات گردید، می‌توان به نتایج تحلیل واریانس اعتماد کرد. از نتایج تحلیل واریانس می‌توان دریافت به ترتیب ولتاژ یا همان فرم قطعه، اصطکاک، دمای آهنگری و نرخ کرنش بیشترین تأثیر را بر نیروی آهنگری دارند.

واضح است هرچه توزیع کرنش‌ها و تنش‌ها یکنواخت‌تر باشد و اختلاف بین بیشترین و کمترین، کمتر باشد کیفیت قطعه بالاتر می‌رود. همچنین هر چه میزان نیروی لازم برای شکل‌دهی کمتر باشد، فرایند ساده‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر خواهد بود، نیاز به تجهیزات کمتری خواهد داشت و در میزان مصرف انرژی صرفه‌جویی خواهد شد. لذا مطلوب‌ترین حالت برای این فرایند این است که تمامی خروجی‌ها در کم‌ترین میزان خود باشند.

حال برای انتخاب بهترین فرم از میان فرم‌های موجود به بررسی تأثیر فرم قطعه بر خروجی‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل 7 مشاهده می‌شود، نمودار به بررسی تأثیر فرم قطعه (ولتاژ) روی خروجی‌ها (نیروی آهنگری و واریانس کرنش و تنش) می‌پردازد. همان‌طور که از شکل 7 مشخص است ولتاژهای 0.06 ولت و 0.12 ولت کمترین نیروی فورج را دارند و همچنین دارای کمترین واریانس کرنش و تنش هستند. اما همان‌طور که قبلاً شرح داده شد، فرم 0.06 ولت به هندسه نهایی قالب نزدیک‌تر است و نمی‌تواند پیش‌فرم مناسبی برای قطعه باشد، لذا فرم 0.12 به‌عنوان بهترین فرم انتخاب می‌شود.

5- شبیه‌سازی

پس از بدست آوردن شکل پیش‌فرم مناسب توسط خطوط هم‌پتانسیل، به تحلیل المان محدود این شکل پیش‌فرم پرداخته می‌شود. بعد از مدل‌سازی قطعه در نرم‌افزار کتیا شکل نهایی قطعه آهنگری بدست می‌آید. با استفاده از این شکل نهایی، قالب‌های نهایی هم استخراج می‌شوند. با توجه به نتایج بدست آمده از طراحی آزمایش، شبیه‌سازی در دمای 1200 درجه سانتی‌گراد و مش تتراهدال با تعریف ماده به‌صورت پلاستیک در نرم‌افزار المان محدود دیفرم سه‌بعدی به‌صورت سه مرحله‌ای انجام می‌گیرد. بدین‌صورت که ابتدا لقمه استوانه‌ای با 30 درصد حجم اضافه نسبت به پیش‌فرم بدست آمده از روش خطوط هم‌پتانسیل داخل قالب پیش‌فرم قرار می‌گیرد. سپس قطعه حاصل از این شبیه‌سازی با حفظ خصوصیات از جمله کرنش و نرخ کرنش در

1. Residuals
2. Anderson-Darling

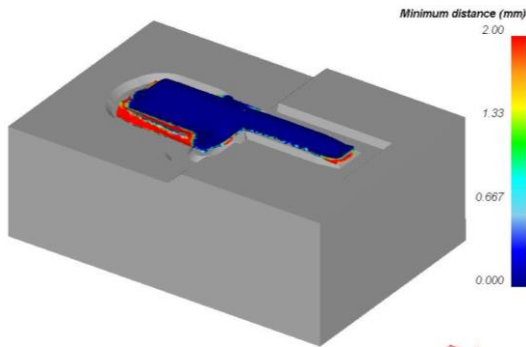


Fig. 8 Forming of the preform obtained from equipotential lines method in 0.12V die

شکل 8 شکل دهی پیش‌فرم بدست آمده از روش خطوط هم‌پتانسیل در قالب 0.12

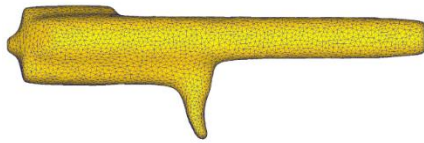


Fig. 9 Preform designed by equipotential lines method

شکل 9 پیش‌فرم طراحی شده به کمک خطوط هم‌پتانسیل

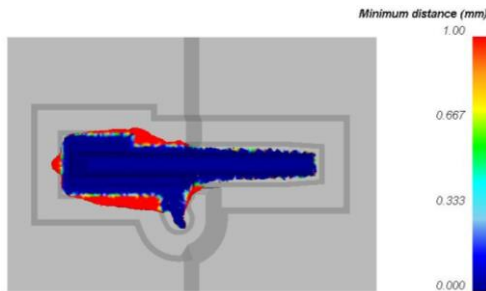


Fig. 10 Simulation of the preform obtained by equipotential lines method with %12 over volume which is completely filled

شکل 10 شبیه‌سازی پیش‌فرم بدست آمده به کمک روش خطوط هم‌پتانسیل با ۱۲ درصد اضافه حجم که قالب کاملاً پر شده است

سپس به کمک این مساحت‌های بدست آمده دایره‌های متناظر رسم شده، سپس این مقاطع به هم متصل شده و پیش‌فرم توزیع جرمی بدست آمده است. در شکل 11 پیش‌فرم طراحی شده به کمک روش توزیع جرمی مشاهده می‌شود.

اکنون لقمه اولیه را در قالب بدست آمده از روش توزیع جرمی، شکل-دهی و پس از حذف پلیسه اضافی اطراف قطعه، در قالب نهایی قرار داده می‌شود. جهت تبدیل لقمه اولیه به پیش‌فرم توزیع جرمی، به 30 درصد اضافه حجم نیاز است. پیش‌فرم بدست آمده به کمک روش توزیع جرمی، در نرم‌افزار دیفرم سه‌بعدی مورد تحلیل واقع می‌شود. اضافه حجم در نظر گرفته شده در مرحله اول 25 درصد است که همان‌گونه که در شکل 12 مشاهده می‌شود، قالب به‌طور کامل پر نشده است.

در مرحله بعد، با در نظر گرفتن اضافه حجم 30 درصد، مجدداً تحلیل انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌گردد، قالب با اضافه حجم 30 درصد به‌طور کامل پر شده است. حجم قطعه آهنگری برابر $1.11E-4$ m³ می‌باشد. حجم پیش‌فرم طراحی شده به روش خطوط هم‌پتانسیل برابر $1.243E-4$ m³ و حجم پیش‌فرم توزیع جرمی که قطعه کار را بدون عیب ظاهری و کامل پر می‌کند برابر $1.443E-4$ m³ است. شبیه‌سازی با پیش‌فرم توزیع جرمی پلیسه‌ای بیشتر از 30% را تولید می‌کند که با توجه به توضیحات داده شده این میزان پلیسه قابل مناسب نیست.

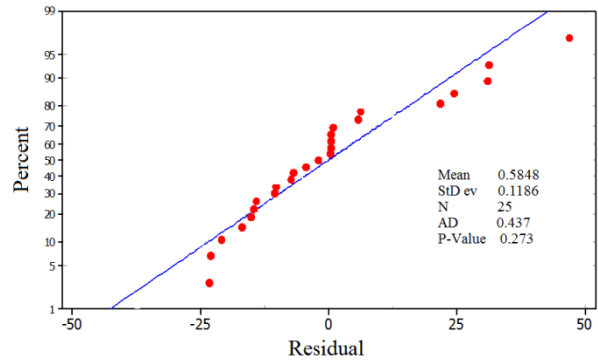


Fig. 5 Normal probability plot

شکل 5 نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده

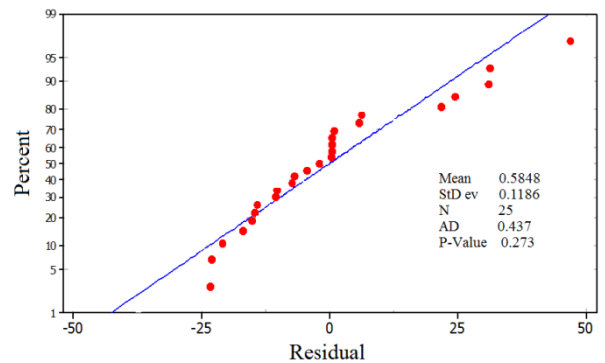


Fig. 6 Residual versus fitted value plot

شکل 6 نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده

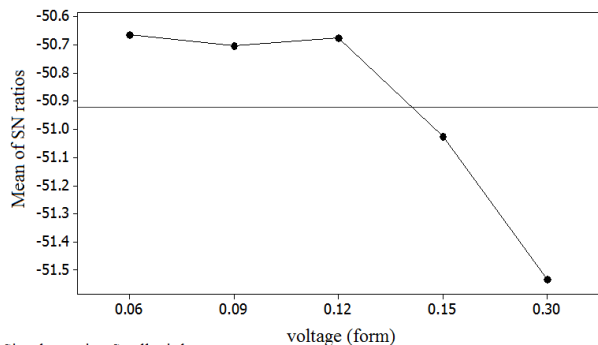


Fig. 7 The s/n ratio plot to select the optimal form

شکل 7 نمودار نسبت S/n جهت انتخاب فرم بهینه

همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است لقمه اولیه در قالب پیش-فرم طراحی شده با روش خطوط هم‌پتانسیل با ولتاژ 0.12 قرار گرفته است و تمامی حفره‌های قالب از مواد پر شده است. همان‌طور که از رنگ‌های مدل مشخص است، قطعه کاملاً به کفه‌های قالب چسبیده است و فضای خالی بین قطعه و قالب وجود ندارد. پیش‌فرم بدست آمده از روش خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی با ولتاژ 0.12 در شکل 9 نشان داده شده است.

حال پیش‌فرم بدست آمده در قالب نهایی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. اضافه حجم 10 درصد برای این پیش‌فرم کافی نیست و قالب پر نمی‌شود ولی با اضافه حجم 12 درصد، قالب به‌طور کامل و بدون عیب و نقص پر می‌شود که در شکل 10 قابل مشاهده می‌باشد. برای طراحی پیش‌فرم با روش توزیع جرمی، قطعه نهایی با فواصل 5 میلی‌متری مقطع زده شده و مساحت هر مقطع بدست آمده است.

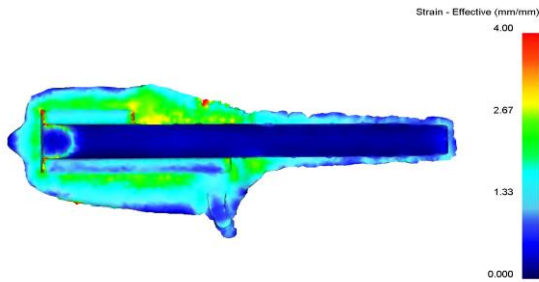


Fig. 14 Strain distribution with equipotential preform
شکل 14 توزیع کرنش در قطعه با پیش‌فرم خط هم‌پتانسیل

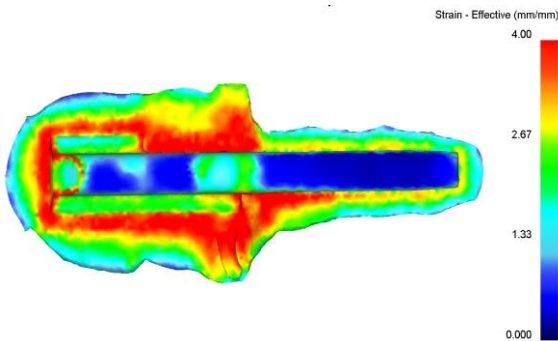


Fig. 15 Strain distribution with mass distribution preform
شکل 15 توزیع کرنش در قطعه با پیش‌فرم توزیع جرمی

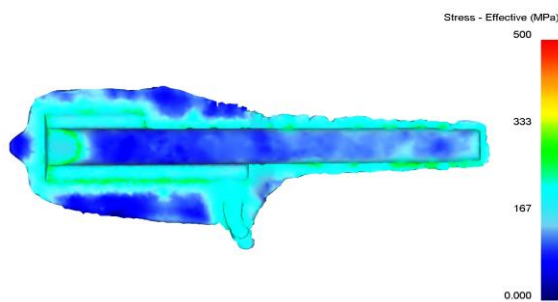


Fig. 16 Stress distribution with equipotential preform
شکل 16 توزیع تنش در قطعه با پیش‌فرم خط هم‌پتانسیل

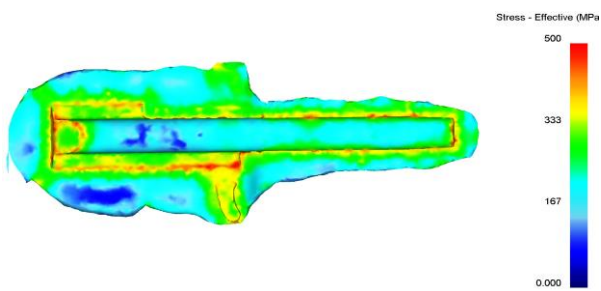


Fig. 17 Stress distribution with mass distribution preform
شکل 17 توزیع تنش در قطعه با پیش‌فرم خط توزیع جرمی

جدول 4 نتایج شبیه‌سازی

Table 4 Simulation results

واریانس کرنش	بار تغییر شکل	واریانس تنش	
249	513	0.519	پیش‌فرم الکترواستاتیک
343	583	0.943	پیش‌فرم سنتی

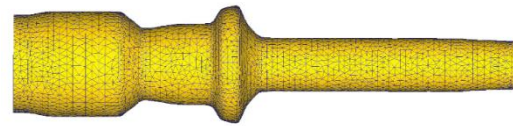


Fig. 11 Preform designed by mass distribution method
شکل 11 پیش‌فرم طراحی شده به روش توزیع جرمی

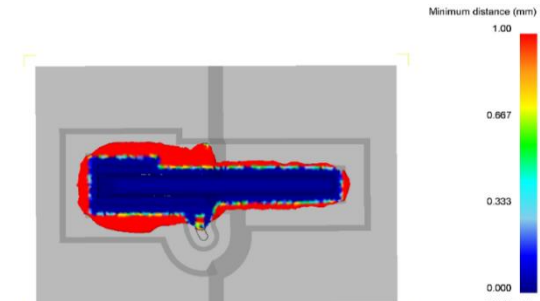


Fig. 12 Simulation of the preform obtained by traditional method with %25 over volume which is not completely filled

شکل 12 شبیه‌سازی پیش‌فرم سنتی با 25 درصد اضافه حجم که قالب کاملاً پر شده است

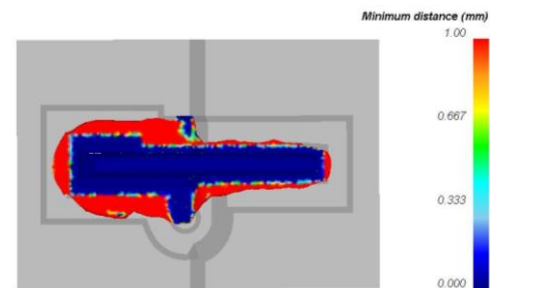


Fig. 13 Simulation of the preform obtained by traditional method with %30 over volume which is completely filled

شکل 13 شبیه‌سازی پیش‌فرم سنتی با 30 درصد اضافه حجم که قالب کاملاً پر شده است

شکل‌های 14 و 15 توزیع کرنش را به ترتیب برای پیش‌فرم طراحی شده به روش خطوط هم‌پتانسیل و پیش‌فرم توزیع جرمی را نشان می‌دهد. شکل‌های 16 و 17 توزیع تنش را به ترتیب برای پیش‌فرم طراحی شده به روش خطوط هم‌پتانسیل و پیش‌فرم توزیع جرمی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف مقادیر کرنش و تنش برای دو حالت مذکور نشان از یک‌نواختی تنش و کرنش برای حالت پیش‌فرم طراحی شده با روش خطوط هم‌پتانسیل دارد که این موضوع از رنگ‌ها کاملاً واضح می‌باشد. برای بررسی بیشتر در جدول 4 واریانس کرنش و تنش و نیروی آهنگری مورد نیاز برای دو حالت با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار محاسبه گردیده است.

در شکل 18 نمودار مقایسه‌ای نیرو بر حسب زمان، برای پیش‌فرم طراحی شده به کمک روش توزیع جرمی (سنتی) و روش خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی مشاهده می‌شود. همان‌گونه که از این نمودار مشخص است، برای شکل‌دهی نهایی پیش‌فرم بدست آمده از خطوط هم‌پتانسیل، نیروی کمتری لازم می‌باشد.

جدول 4 کاهش نزدیک به 45 درصدی در توزیع کرنش و کاهش 12 درصدی در نیروی مصرفی برای آهنگری و کاهش 27 درصدی در توزیع تنش مؤثر را نشان می‌دهد. طبق گفته‌های قبلی هدررفت مواد نیز از 5.5 گرم در حالت پیش‌فرم سنتی به 3.22 گرم در حالت پیش‌فرم خطوط هم‌پتانسیل رسیده است.

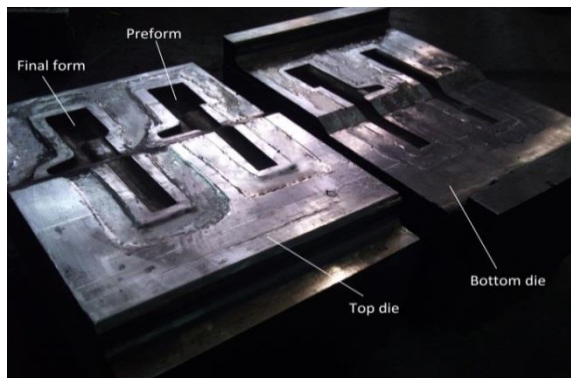


Fig. 19 Forging die

شکل 19 قالب آهنگری ساخته شده



Fig. 20 Trimmed and untrimmed forged product

شکل 20 قطعه نهایی با پلیسه و پلیسه‌بری شده

8- مراجع

- [1] R. Douglas and D. Kuhlmann, Guidelines for precision Hot Forging with Applications, *Materials Processing Technology*, Vol. 98, pp. 182-188, 2000.
- [2] S. R. Lee, Y. K. Lee, C. H. Park, D. Y. Yang, A new method of preform design in hot forging by using electric field theory, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, No. 4, pp. 773-792, 2002.
- [3] Y. Yanhui, F. Li, Sh. Wang, S. J. Hu, Preform design of powder metallurgy turbine disks using equi-potential line method, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, pp. 677, 2006.
- [4] X. Wang, F. Li, A Quasi-equipotential Field Simulation for Preform Design of P/M Superalloy Disk, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 22, No. 1, pp. 81-86, 2009.
- [5] J. Cai, F. Li, T. Liu, A new approach of preform design based on 3D electrostatic field simulation and geometric transformation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012
- [6] J. Cai, F. Li, T. Liu, Preform Design for Large-Sized Frame Forging of Ti-Alloy Based on 3-D Electrostatic Field Simulation and Geometric Transformation, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, No. 9, pp 1491-1496, 2011.
- [7] F. Al-Mufadi, Optimization of Preform Die Shape for Forging AA2017 Turbine Disk Using Electrostatic Field Theory, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 22, pp.4817-4823, 2014.
- [8] Y. Guan, X. Bai, M. Liu, L. Song, G. Zhao, Preform design in forging process of complex parts by using quasi-equipotential field and response surface methods, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, No. 1, pp 21-29, 2015.

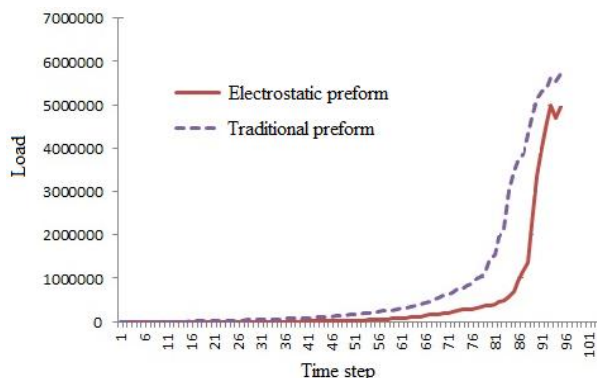


Fig. 18 Comparison of force versus time for traditional and equipotential preforms

شکل 18 مقایسه نمودار نیرو بر حسب زمان برای پیش‌فرم سنتی و خطوط هم‌پتانسیل

6- انجام آزمایش عملی

برای انجام آزمایش عملی قالب نهایی و پیش‌فرم‌های مورد نیاز ساخته شدند. برای ساخت کفه‌های قالب نهایی از فولاد گرم کار با سختی بین 47 تا 49 راکول‌سی استفاده شد. در شکل 19 قالب ساخته‌شده قابل مشاهده است. برای اجرای فرایند آهنگری از یک پرس ضربه‌ای استفاده شد. نمونه‌های فولادی توسط کوره گازی تا دمای 1200 درجه سانتی‌گراد، به مدت 15 دقیقه گرم، و با ترکیبی از گرافیت و روغن صنعتی به‌عنوان روانساز، آهنگری شدند. برای کاهش خطا، هر آزمایش عملی با سه بار تکرار انجام گرفت. قبل از انجام عملیات دمایی قالب به 250 تا 300 درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شود تا اثرات سرد شدن توسط قالب به حداقل برسد. قبل از قرارگیری قطعه روی قالب پیش‌فرم مواد روان‌ساز کاملاً روی سطح قالب قرار گرفته و به‌وسیله جریان هوای فشرده جرم اضافی از روی سطح زدوده شد. پس از اعمال فشار، قطعه به شکل پیش‌فرم تبدیل می‌شود. پیش‌فرم پلیسه‌بری شده، مجدداً داخل کوره قرار گرفته و پس از 15 دقیقه در قالب نهایی شکل‌دهی گردید. همانطور که در شکل 20 قطعه نهایی به همراه پلیسه اضافه و پلیسه‌بری شده مشاهده می‌شود، محفظه قالب بدون عیب و کامل با حجم پلیسه 12% پر شده است و این تأییدی بر نتایج شبیه‌سازی‌هاست.

7- نتیجه‌گیری

در این مطالعه هدف، طراحی و بررسی پیش‌فرم برای قطعه نامتقارن محوری فولادی طولی بوده است. برای این منظور از روش خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی استفاده شد. هدف اصلی این تحقیق، کاهش دورریز مواد اولیه بوده و در کنار آن اهداف کاهش نیروی آهنگری و کاهش پراکندگی توزیع کرنش و تنش نیز دنبال شده است. انطباق نتایج آزمایش‌های تجربی شبیه‌سازی‌ها مؤید استفاده از روش خطوط هم‌پتانسیل برای طراحی پیش‌فرم می‌باشد. از نتایج بدست آمده در این تحقیق، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- کاهش دورریز مواد در قطعه نهایی به میزان 137 گرم نسبت به روش توزیع جرمی.
- کاهش پراکندگی توزیع کرنش به میزان 45% نسبت به روش توزیع جرمی.
- کاهش پراکندگی توزیع تنش مؤثر به میزان 27% نسبت به روش توزیع جرمی.
- کاهش نیروی آهنگری به میزان 12% نسبت به روش توزیع جرمی.
- پر شدن کامل و بدون عیب و نقص حفره‌های قالب.
- با توجه به کاهش نیروی آهنگری و همچنین کاهش پراکندگی کرنش و تنش مؤثر می‌توان انتظار داشت عمر قالب به میزان قابل‌توجهی افزایش یابد.

- [10] Y. Tao, J. Zhou, J. Cao, Y. Luo, B. Chen, Optimization design preform billet shape of 7050 aluminum alloy giant plane forgings based on electric field method and MBC toolbox, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, No. 1-4, p231, 2015.
- [9] Y. Xia, B. Chen, W. Du, X. Yang, Pre-forming design in forging process based on equipotential field and model, *Journal of Central South University (Science and Technology)*, Vol. 46, No. 3, pp. 804-811, 2015.