مجلهٔ فنی و مهندسی مدرس- مکانیک
شمارهٔ ۳۹، بهار ۱۳۸۹

«یادداشت تحقیقاتی»

شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی توسط پلاستیسین برای تولید قطعه گردویی پلوس با استفاده از فرایند فورج دقیق

یوسف پارسه[۱]، محمد حسین صادقی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد مهندس مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

***تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵**
sadeghim@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: بهمن ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۷)

چکیده- از مفاصل انتقال قدرت سرعت ثابت، به‌طور وسیعی در صنعت خودرو استفاده می‌شود. قطعه گردویی یکی از قطعات مفصل انتقال قدرت است. تولید این قطعه به روشهای سنتی، مستلزم صرف زمان و هزینه تولید بالایی است. هدف اصلی این مقاله، بررسی جریان مواد در فرایند فورج دقیق قطعه گردویی و بهینه‌سازی فرایند با استفاده از روشهای جدید قالب‌سازی است. برای تعیین و بهبود شرایط فرایند، شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Super Forge و آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی انجام شده است. برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عددی و بررسی جریان مواد در مدل‌سازی فیزیکی، از پلاستیسین استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی، انطباق خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

کلیدواژگان: فورج دقیق، گردویی پلوس، مدل‌سازی فیزیکی، پلاستیسین.

۱- مقدمه

فورجینگ یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای شکلدهی فلزها محسوب می‌شود. فرایند شکلدهی فلز تحت فشار یا ضربه به‌منظور تولید قطعه‌ای با شکل هندسی و خواص مطلوب را فورجینگ می‌نامند. در روشهای جدید فورجینگ، تلاش برای دستیابی به قطعه مطلوب همراه با صرفه‌جویی در مواد، هزینه‌هاورسیدن به خواص مکانیکی و متالورژیکی بهتر و کاستن از عملیات ماشینکاری است که این باعث دستیابی به روش فورج دقیق[1] شده است [۱].

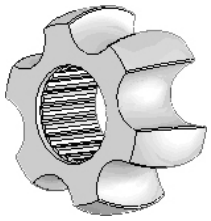
تعداد زیادی از قطعات، طرح هندسی نامتقارن و بسیار پیچیده‌ای دارند. روشهای فورج سنتی همیشه قابلیت تولید قطعات پیچیده را ندارند؛ بنابراین چنین قطعاتی توسط فرآیندهایی که نیاز به عملیات ماشینکاری زیادی دارند، تولید می‌شوند که این هزینه تولید را بالا می‌برد.

1. Precision Forging

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

قطعه گردویی پلوس یکی از قطعاتی است که تولید آن با مشکلات بسیاری روبه‌رو است (شکل ۱).



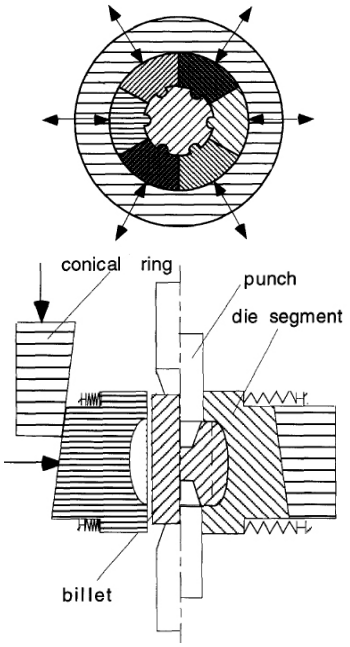
شکل ۱ نمای سه بعدی قطعه گردویی

سطوح شیارها در قطعه فوق باید بسیار صاف و صیقلی باشد (در حد ٤ تا ٨ میکرون زبری داشته باشد) و استحکام این قطعه نیز در برابر سایش و تنش‌های خستگی باید زیاد باشد، بنابراین فورج سرد دقیق یکی از بهترین گزینه‌هایی است که توسط آن می‌توان به سطوحی با کیفیت بالاتر و استحکام بیشتر دست یافت [۲].

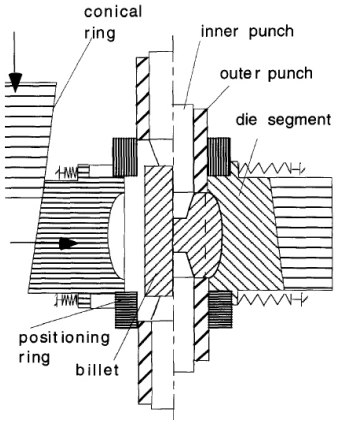
قطعه گردویی به علت داشتن خروج از مرکزی در مرکز شیارها نسبت به مرکز قطعه، دارای شکل هندسی پیچیده‌ای بوده و این خروج از مرکزی باعث به‌وجود آمدن شیب منفی در قطعه می‌شود، در نتیجه خروج چنین قطعه‌ای از قالب فورج با استفاده از روش‌های معمول امکان‌پذیر نیست.

در سال ۱۹۹۲کینچی و اوندرا. قطعه گردویی را تا حدودی نزدیک به حالت نهایی[1] در طی چند مرحله با استفاده از فرایند فورج سرد تولید کرده‌اند. قطعه نهایی فورج شده، به عملیات ماشینکاری نسبتاً زیادی نیاز داشت [۳].

در سال ۱۹۹٦ واکوئز و همکاران به علت مشکل خروج قطعه فرم یافته از قالب، طرحی را ارائه کرده‌اند که می‌تواند قطعه فوق را توسط فرایند فورج سرد دقیق به صورت نزدیک به حالت نهایی تولید کند. در این طرح از قالب‌های چند تکه استفاده شده که در آن بعد از فرایند شکلدهی، تکه‌های قالب از هم جدا شده و قطعه به‌راحتی از قالب خارج می‌شود [٤]. ساختار قالب‌های چند تکه ارائه شده توسط واکوئز و همکاران در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. قطعه تولید شده توسط واکوئز و همکاران از نظر شکل هندسی با قطعه مورد مطالعه در این مقاله تفاوت‌هایی دارد.



شکل ۲ مکانیزم پانچ ساده [٤]



شکل ۳ مکانیزم پانچ دو کاره [٤]

1. Near Net Shape

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

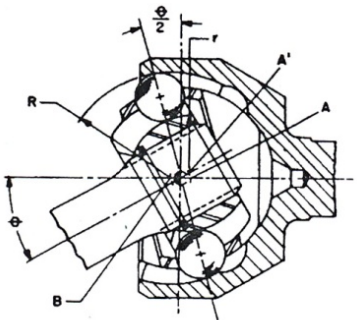
قالب‌های چندتکه به دو گونه پانچ ساده و پانچ دو کاره تقسیم می‌شود. تفاوت این دو در آن است که در پانچ دوکاره هر یک از سنبه‌های بالایی و پایینی به دو سنبه داخلی و خارجی تقسیم می‌شود. این طرح باعث می‌شود که پر شدن قالب و کنترل حجم بیلت اولیه راحت‌تر انجام شود. برای تولید قطعه توسط قالب‌های چندتکه، به پرس‌های چندکاره برای شکل دادن قطعه و باز و بسته کردن تکه‌های قالب نیاز است. بنابراین تولید قطعه گردویی توسط روشهای فوق، با امکانات و تجهیزات بسیار گران‌قیمت انجام می‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد قالب‌های چندتکه به [٤] مراجعه شود.

در این مقاله روشی ارائه شده که با آن می‌توان قطعه گردویی را با امکانات و تجهیزات کمتر و ساده‌تری تولید کرد. تولید قطعه فوق توسط این روش، با تغییر بسیار جزیی در هندسه قطعه صورت می‌گیرد که این باعث می‌شود قطعه به‌راحتی از قالب خارج شود. این تغییر در هندسه قطعه، توسط عملیات ساده ماشین‌کاری حذف می‌شود. این روش بسیار مقرون به صرفه بوده و برای تولید انبوه قطعه روش مناسبی است.

۲- مفصل انتقال قدرت و معرفی قطعه گردویی مورد مطالعه

مفاصل انتقال قدرت به‌عنوان واسطه‌ای برای انتقال گشتاور یا حرکت دورانی از محوری به محور دیگر به‌کار می‌روند. یکی از انواع مفاصل انتقال قدرت، مفصل سرعت ثابت[1] یا پلوس است که در آن سرعت زاویه‌ای محورهای ورودی و خروجی برابر است. این مفاصل قابلیت انتقال قدرت را با سرعت ثابت در یک زاویه نسبتاً بزرگ دارند و نیز می‌توانند گشتاورهای پیچشی و بارهای بزرگ محوری را تحمل نمایند. مفاصل سرعت ثابت شامل محفظه داخلی (گردویی)، محفظه خارجی، شش ساچمه و یک قفسه بین محفظه داخلی و خارجی است. موقعیت ساچمه‌ها به مقدار زاویه انحراف پلوس بستگی دارد و در حالت کلی در طول مسیر شیارها متغیر است [۲].

در شکل٤ نمایی از پلوس با زاویه انحراف θ، نشان داده شده است.



شکل٤ نمایی از پلوس شپا با زاویه انحراف θ [۲]

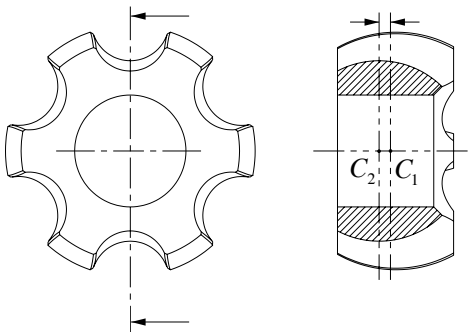
محفظه داخلی یا گردویی، قطعه‌ای حلقوی با تقارن محوری است که شیارهایی بر روی سطح خارجی آن تعبیه شده. شکل این محفظه شبیه به مقطعی از کره است. شیارهای واقع در سطح خارجی قطعه نیز محدب و به شکل مقطعی از کره است. در سطح داخلی آن شیارهایی به شکل هزار خار مادگی برای کوپل شدن به محور ایجاد شده است. این قطعه معمولاً توسط یک یا چند خار حلقوی بر روی هزار خار محور محکم می‌شود. وظیفه گردویی، انتقال گشتاور از شفت به ساچمه‌ها است [۲].

در شکل ٥ نمای دو بعدی قطعه گردویی در حالت بدون هزارخار داخلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، C۱ مرکز سطح خارجی قطعه یا مرکز مفصل و C۲ مرکز دایره شیار قطعه است که به

1. Constant Velocity Joint

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

فاصله ۳/۹ میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند و این اختلاف فاصله باعث به‌وجود آمدن خروج از مرکزی نسبت به مرکز مفصل می‌شود. در این صورت قطر بیشینه سطح خارجی و قطر ماکزیمم شیار قطعه بر روی یکدیگر قرار نمی‌گیرند.



شکل۵ نمای برش خوردهٔ قطعه گردویی

لازم است ذکر شود که سطوح شیارهای قطعه به علت تحمل بیشترین تنش‌های سایشی و سیکلی، بحرانی‌ترین و حساس‌ترین قسمت قطعه گردویی، است [۲].

۳- ساخت قطعه گردویی پلوس

مراحل معمول ساخت قطعه گردویی پلوس به صورت زیر است [۵]:

- برطرف کردن پوسته‌های سطح میله بیلت برای کنترل دقیق حجم.
- بریدن بیلت از یک میله طولانی سرد.
- فرایند فورج سرد.
- سوراخکاری مرکز قطعه و ایجاد هزارخار و ماشین‌کاری سطوح خارجی قطعه.
- عملیات حرارتی کربورایزینگ[1]
- سنگ‌زنی بر روی سطح شیارهای قطعه، به‌منظور دستیابی به کیفیت مطلوب سطح.

٤- مشکلات تولید قطعه گردویی

- خروج از مرکزی هندسه قطعه گردویی باعث می‌شود که خروج قطعه شکل یافته از قالب با روشهای معمول غیر ممکن باشد.
- دستیابی به کیفیت سطح مطلوب در سطوح شیارها (در حدود ٤-۸ میکرون) بسیار مشکل است.
- قطعه گردویی تحت بارهای سایشی و تنش‌های سیکلی زیادی قرار دارد. بنابراین قطعه ساخته شده باید از نظر استحکام و خصوصیات مکانیکی، در سطح مطلوب و مورد قبول باشد.
- در فرایند فورج سرد قطعه گردویی، به‌دلیل افزایش کارسختی، معضل عدم تغییر شکل‌پذیری و پرنشدن گوشه‌ها و لبه‌های قالب وجود دارد.

۵- روش طراحی قالب، برای فرایند فورج سرد قطعه گردویی

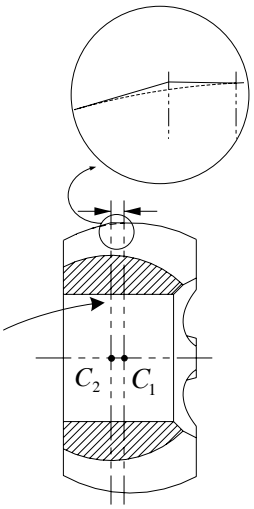
تولید قطعه گردویی با استفاده از روشهای پیشین به امکانات و تجهیزات بسیار زیاد و گران‌قیمتی نیاز دارد و هزینه اولیه تولید این قطعه توسط این روشها بالا است. در این مقاله روشی ارائه شده که در آن تولید قطعه با امکانات و تجهیزات بسیار ساده‌تر و با هزینه کمتر صورت می‌گیرد. همان‌طور که در معرفی قطعه گردویی اشاره شد، خروج از مرکزی هندسه قطعه گردویی باعث می‌شود که در صورت انتخاب خط جدایش قالب در هر قسمتی از قطعه، دهانه قالب تنگ‌تر از قسمت‌های دیگر آن شود؛ باعث به‌وجود آمدن شیب منفی در قطعه شده و خروج قطعه را از

1. Carburizing

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

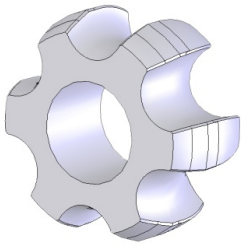
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

قالب ناممکن می‌سازد. در نتیجه برای خروج قطعه از قالب، تغییری را در هندسه قطعه ایجاد کرده و به صورت زیر عمل می‌کنیم (شکل ٦):



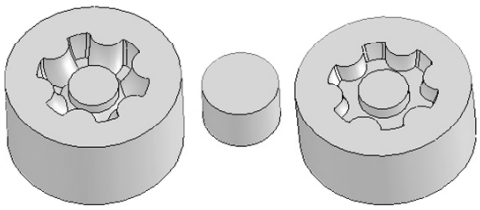
شکل ٦ نحوه تغییر شکل هندسی قطعه گردویی

همان‌طور که اشاره شد، بحرانی‌ترین و حساس‌ترین قسمت قطعه گردویی، سطوح شیارهای آن است. بنابراین طراحی قالب باید به نحوی صورت گیرد که شیارهای این قطعه حتی‌الامکان به شکل نهایی مورد نظر تولید شود. در نتیجه محل خط جدایش حفره‌های قالب، در روی مرکز مسیر شیارها و در روی بیشترین قطر شیار انتخاب می‌شود؛ در این صورت سطوح خارجی قطعه به علت خروج از مرکزی نسبت به مرکز شیارها دارای شیب منفی بوده و از قالب خارج نمی‌شود. برای این کار خطی را با شیب یک درجه از مرکز سطوح خارجی تا مرکز شیارها مماس کرده و بدین ترتیب هندسه قطعه تغییری جزئی می‌یابد و این باعث می‌شود که قطعه از قالب خارج شود. این تغییر هندسی در روی سطوح خارجی قطعه، پس از فرایند فورج، به‌راحتی در عملیات ساده ماشین‌کاری حذف می‌شود. شکل ۷ نمای سه‌بعدی قطعه گردویی را پس از تغییر هندسه نشان می‌دهد.



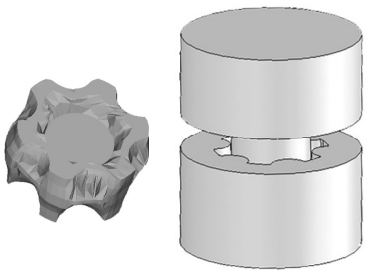
شکل ۷ نمای سه بعدی قطعه پس از تغییر هندسه

بنابراین می‌توان قالب فورج را به دو نیمه بالایی و پایینی تقسیم کرده و با انتخاب یک بیلت استوانه‌ای، فرایند فورج قطعه گردویی را توسط نرم‌افزار Msc Super Forge شبیه‌سازی کرد. شکل۸ نمای سه‌بعدی نیمه‌های قالب و بیلت اولیه را نشان می‌دهد.



شکل ۸ نمای سه‌بعدی نیمه‌های قالب و بیلت اولیه

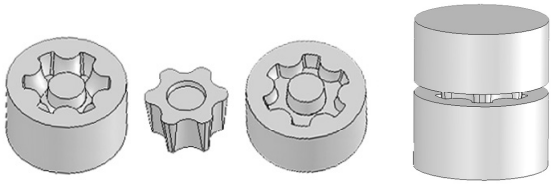
اما با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که قبل از پر شدن قالب، مواد از اطراف حفره‌ها بیرون زده و بنابراین قالب بسته نمی‌شود. همچنین باعث آسیب‌دیدگی سطوح قالب می‌شود.



شکل ۹ الف: نیمه‌های قالب و بیلت اولیه در حالت بسته
ب: قطعه شکل گرفته

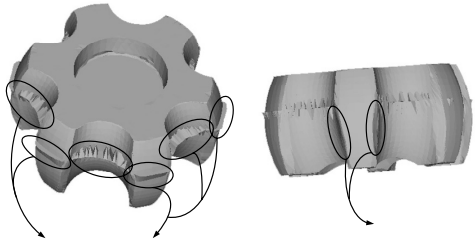
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

بنابراین نتیجه گرفته شد که برای راحت‌تر پر شدن قالب، قطعه پیش‌فرم لازم است. نزدیکترین قطعه پیش‌فرم به شکل نهایی قطعه گردویی همراه با نیمه‌های قالب در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ قطعه پیش‌فرم همراه با نیمه‌های قالب

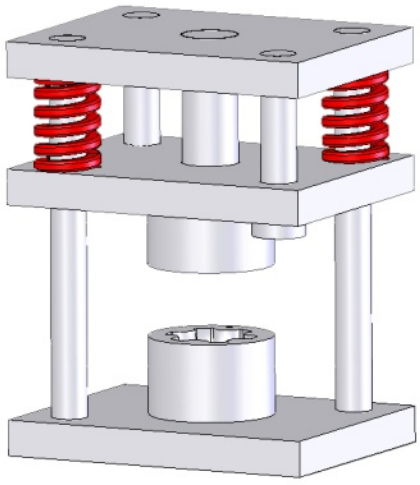
اما همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود در این حالت نیز قبل از اینکه گوشه‌ها و لبه‌های قالب پر شوند، مواد از محل خط جدایش نیمه‌های قالب بیرون زده و باعث بسته نشدن قالب یا له شدن سطوح حفره‌ها می‌شود.



شکل ۱۱ قطعه شکل گرفته با استفاده از پیش فرم

در نهایت، تولید قطعه گردویی توسط فرایند فورج دقیق، باید در یک حفره کاملاً بسته صورت گیرد تا هیچ‌گونه خروجی مواد و پلیسه از اطراف حفره نداشته باشد.

در این‌صورت، قالب فورج به دو نیمه بالا و پایین تقسیم می‌شود و بیلت استوانه‌ای بین دو نیمه قرار می‌گیرد. بنابراین زمانی که نیمه‌های بالایی و پایینی قالب بر روی هم قرار گرفته و کاملاً بسته می‌شوند، سنبه به حفره بالایی وارد شده و بیلت استوانه‌ای به اطراف جریان پیدا کرده و قالب پر می‌شود. در شکل۱۲ نمای سه‌بعدی قالب طراحی شده برای آزمایش مدل‌سازی فیزیکی، نشان داده شده است.



شکل ۱۲ ساختار فنری طراحی شده برای مدل‌سازی فیزیکی

فرایند تولید قطعه در این ساختار با استفاده از پرس ساده صورت می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیمه پایینی قالب به کفشک پایین و نیمه بالایی قالب به کفشک وسط پیچ شده ؛ سنبه نیز به کفشک بالا متصل است. برای عملکرد قالب و شکلدهی قطعه داخل حفره کاملاً بسته، از دو فنر به‌طور موازی استفاده شده که دور میل راهنما قرار دارد. عملکرد قالب و ساختار آن به صورت زیر است:

ابتدا نیمه‌های بالایی و پایینی قالب از هم باز و بیلت استوانه‌ای داخل حفره قالب قرار داده می‌شود؛ سپس کل مجموعه کفشک وسط و کفشک بالا که توسط دو میله به یکدیگر متصل شده‌اند، پایین می‌آید تا جایی که نیمه‌های بالایی و پایینی قالب بر روی هم قرار گرفته و کاملاً بسته شوند. با افزایش فشار پرس، فنرها به‌آرامی فشرده و سنبه به حفره قالب وارد شده و شکلدهی کامل می‌شود. پس از پر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

شدن قالب و رسیدن سنبه به پایان حرکت خود، فشار از روی قالب برداشته می‌شود. در این صورت فنرها باز شده و سنبه از داخل حفره قالب خارج می‌شود. سپس با بالاتر رفتن رم[1] پرس، میله‌های رابط باعث می‌شوند که نیمه‌های قالب از هم باز شده و قطعه نهایی از قالب خارج شود.

باید در نظر داشت که فشار بستن قالب از فشار داخل حفره قالب در انتهای فرایند شکلدهی بیشتر باشد؛ در غیر این صورت نیروی پر شدن قالب بر نیروی فنر غلبه کرده، نیمه‌های قالب از هم باز شده و مواد از اطراف آن خارج و باعث خرابی قالب می‌شود [٦].

٦- شبیه‌سازی عددی به روش FVM[2]

در این مقاله، فرایند شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار super forge برای دو جنس مختلف انجام شده است:

- جنس AISI ۱۰۵۰ که به‌عنوان جنس اصلی قطعه گردویی انتخاب شده است.
- جنس پلاستیسین که به‌عنوان جنس قطعه برای آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی انتخاب شده است.

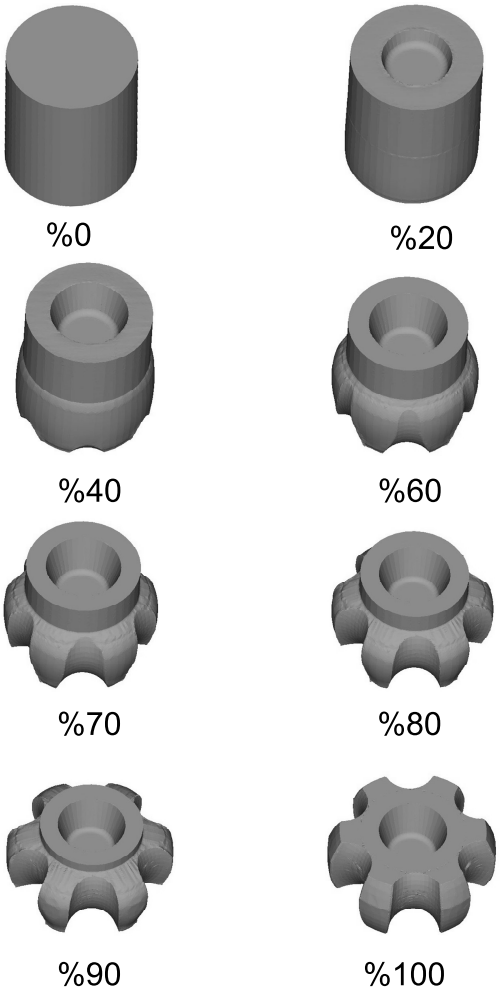
جدول۱ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی(FVM) را برای AISI ۱۰۵۰ نشان می‌دهد.

جدول ۱ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی(FVM) را برای جنس AISI ۱۰۵۰ [٤]

AISI ۱۰۵۰	جنس قطعه‌کار
AISI M2	جنس قالب
۰/۱	ضریب اصطکاک
۱۰۰mm/s	سرعت رم پرس
۲۰°C	دمای فرایند
$\bar{\sigma} = 971\bar{\varepsilon}^{0.16}$	رابطه تنش-کرنش

شکل۱۳ نحوه شکل‌گیری قطعه را در کورس‌های مختلف جابه‌جایی سنبه، با درصدهای ذکر شده نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکلها مشاهده می‌شود، نحوه شکلدهی فرایند به‌صورت کوبش انجام شده و جریان مواد داخل حفره قالب به صورت عرضی بوده و گوشه‌ها و لبه‌های قطعه در آخرین مرحله کامل شده و پر می‌شوند.

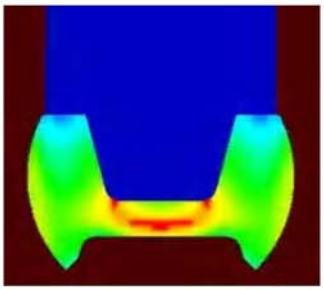


شکل ۱۳ نحوه شکل‌گیری قطعه در کورس‌های مختلف جابه‌جایی سنبه

شکل ١٤ نمای دو بعدی شکل‌گیری قطعه گردویی را نشان می‌دهد.

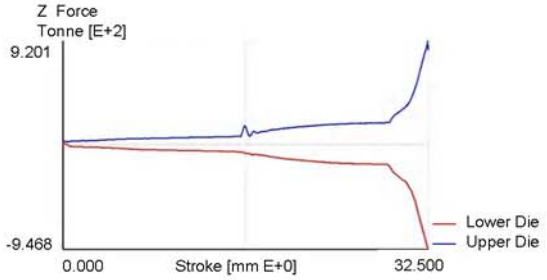
1. Ram
2. Finite Volume Method

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]



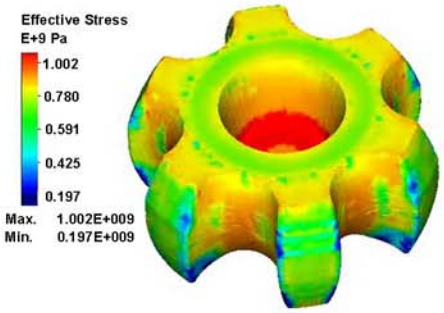
شکل ١٤ نمای دو بعدی شکل‌گیری قطعه گردویی

شکل١٥ نمودار تغییرات نیرو بر حسب طول کورس تعیین شده را نشان می‌دهد که منحنی بالا مربوط به سنبه و منحنی پایین مربوط به حفره قالب است. بنابراین مطابق شکل، نیروی شکلدهی در انتهای فرایند در حدود ٩٢٠ تن به‌دست آمده است.



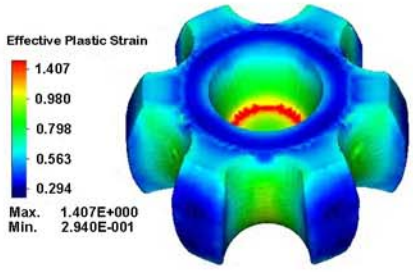
شکل ١٥ نحوه شکل‌گیری قطعه در کورس‌های مختلف جابه‌جایی سنبه

شکل١٦ توزیع تنش مؤثر در انتهای فرایند شکلدهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با صرف‌نظر کردن از راهگاه قطعه- که بحرانی‌ترین قسمت قطعه در فرایند شکلدهی است- سطوح شیارهای قطعه گردویی در مقایسه با دیگر سطوح قطعه، تحت تنش بیشتری قرار گرفته است. علت آن است که مواد داخل حفره قالب پس از رسیدن به سطوح شیارها، بیشترین فشار قالب را تحمل کرده و دارای بیشترین کرنش است؛ در نتیجه تنش مؤثر در سطوح شیارها، نسبت به سایر نقاط قطعه، افزایش بیشتری یافته و بحرانی‌تر است.



شکل١٦ توزیع تنش مؤثر در پایان فرایند شکلدهی

شکل١٧ توزیع کرنش پلاستیک مؤثر را در پایان فرایند نشان می‌دهد. در این شکل نیز با صرف‌نظر از راهگاه قطعه، سطوح شیارها به علت کشیدگی مواد بر روی سطوح قالب و افزایش فشار قالب، تحت تأثیر بیشترین کرنش مؤثر قرار دارند.

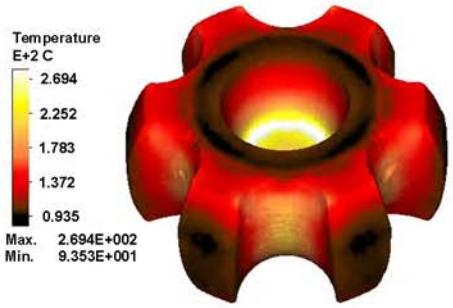


شکل١٧ توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در پایان فرند

شکل١٨ توزیع دمای قطعه گردویی را در پایان فرایند شکلدهی نشان می‌دهد. افزایش دمای قطعه‌کار، با پارامترهای تنش و کرنش مؤثر نسبت مستقیم دارد. بنابراین شیارهای قطعه گردویی به علت متحمل شدن بیشترین تنش و کرنش مؤثر، بیشترین افزایش دما را دارند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]



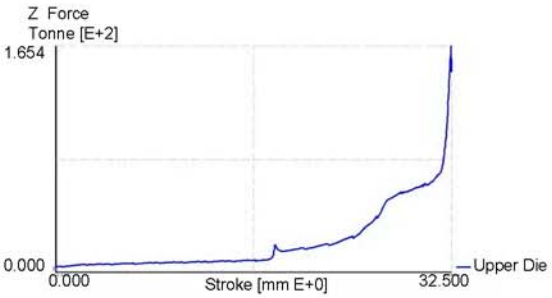
شکل۱۸ توزیع دمای قطعه گردویی در پایان فرایند شکلدهی

جدول۲ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی(FVM) را برای جنس پلاستیسین نشان می‌دهد.

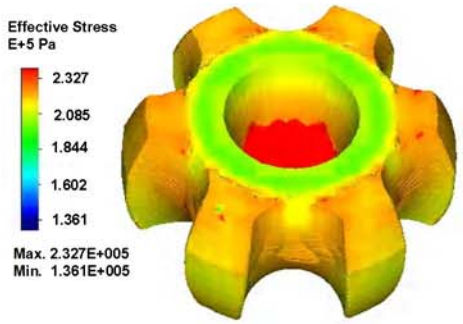
در شکلهای ۱۹ تا ۲۲ به‌ترتیب نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابه‌جایی، توزیع تنش مؤثر، توزیع کرنش پلاستیک مؤثر و توزیع دما برای جنس پلاستیسین نشان داده شده است.

جدول۲ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی(FVM) برای جنس پلاستیسین [۷ و ۸]

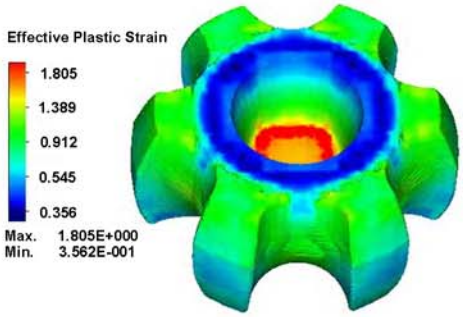
پلاستیسین	جنس قطعه‌کار
AISI M2	جنس قالب
۰/۱	ضریب اصطکاک
۱۰۰mm/s	سرعت رم پرس
۲۰ °C	دمای فرآیند
$\bar{\sigma} = 0.208\bar{\varepsilon}^{0.133}$	رابطه تنش-کرنش



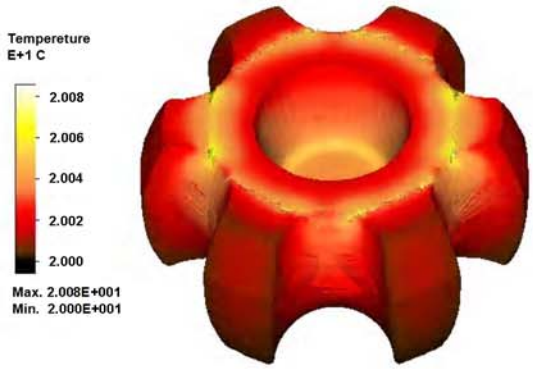
شکل۱۹ نمودار تغییرات نیرو - جابه‌جایی برای پلاستیسین



شکل۲۰ توزیع تنش مؤثر در پایان فرایند شکلدهی برای پلاستیسین



شکل ۲۱ توزیع کرنش پلاستیکی مؤثر در پایان مرحله برای پلاستیسین



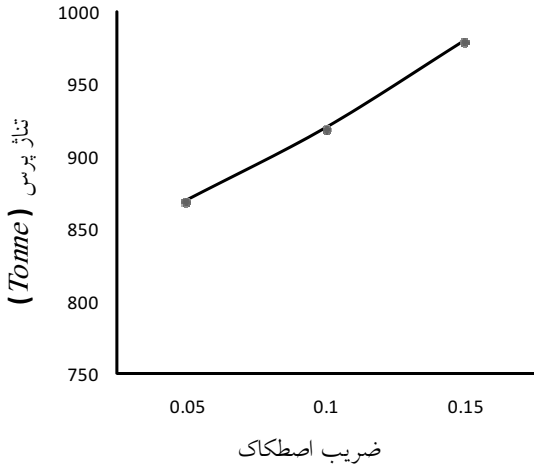
شکل ۲۲ توزیع دمای قطعه گردویی، در پایان فرایند شکلدهی برای ماده پلاستیسین

محدوده ضریب اصطکاک (m) تحت روانکارهای مختلف برای فرایند فورج سرد بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ انتخاب شده است [۱]. بنابراین برای سه مقدار مختلف ضریب

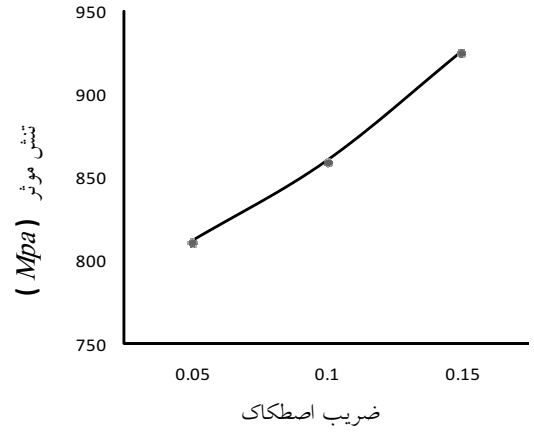
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

اصطکاک، تغییرات نیروی شکلدهی بر طبق شکل۲۳ برای تولید قطعه گردویی با جنس AISI 1050 بررسی شده است. همان‌طور که انتظار داشتیم، با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی شکلدهی افزایش می‌یابد.

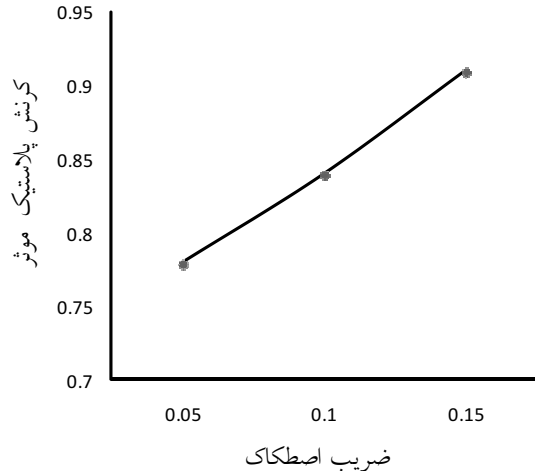
در شکل۲٤ و ۲۵ تأثیر ضریب اصطکاک بر تنش و کرنش پلاستیک مؤثر نشان داده شده است. با افزایش ضریب اصطکاک، جریان مواد بر روی سطوح قالب، دشوارتر می‌شود. در نتیجه تنش و کرنش پلاستیک مؤثر افزایش می‌یابد.



شکل ۲۳ تغییرات تناژ پرس بر حسب ضریب اصطکاک



شکل ۲٤ تغییرات تنش موثر بر حسب ضریب اصطکاک



شکل ۲۵ تغییرات کرنش پلاستیک موثر بر حسب ضریب اصطکاک

۷- آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی

از آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی برای مطالعه و پیش‌بینی جریان مواد داخل حفره قالب و نحوه پر شدن آن و همچنین بررسی شکل صحیح هندسه قطعه مورد نظر قبل از ساخت قالب اصلی استفاده می‌شود. برای این منظور، قالب مربوط با استفاده از جنس معمولی ساخته شده و برای آزمایش قالب، از موادی نرم مانند پلاستیسین، سربو موم و ... استفاده می‌شود.

در این مقاله، برای آزمایش قالب از جنس پلاستیسین استفاده شده. که در ابتدا به صورت خمیر بوده و پس از گذشت زمان سخت می‌شود. برای انجام آزمایش، ابتدا بیلت استوانه‌ای با ابعاد مشخص از جنس پلاستیسین ساخته و داخل حفره قالب قرار داده می‌شود. سپس با حرکت رم پرس و وارد شدن سنبه به داخل حفره قالب، جنس مربوط شکل می‌یابد. برای انجام این آزمایش، از پرس هیدرولیک ساده برای تغییر شکل استفاده شده است. لازم است ذکر شود که برای دستیابی به جریان صحیح مواد به داخل حفره قالب و همچنین نزدیک بودن آن به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

فرایند فلز اصلی، انتخاب شرایط اصطکاک بین قطعه‌کار و قالب، باید بسیار نزدیک به فرایند واقعی صورت گیرد. بنابراین انتخاب روانکار مناسب، برای آزمایش مدل‌سازی فیزیکی، برای دستیابی به جریان صحیح مواد، بسیار بحرانی و مهم است. روانکارهای مورد استفاده در آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی توسط پلاستیسین به صورت زیر است [٤] و [٨]:

مخلوط گلیسیرین و آب صابون، وازلین، گریس و...

در این آزمایش - با توجه به پیچیدگی شکل هندسی قطعه و مکانیزم قالب، روانکار گریس بهتر جواب داده است. شکلهای٢٦ تا ٢٨ قالب مربوط به انجام آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی را همراه با قطعات تولید شده نشان می‌دهد.

شکل ٢٦ بیلت اولیه داخل قالب قبل از تغییر شکل زیر پرس هیدرولیک

شکل ٢٧ قطعه نهایی داخل حفره قالب پس از تغییر شکل زیر پرس هیدرولیک

شکل ٢٨ نحوه شکل گیری قطعه گردویی در کورس‌های مختلف جابه‌جایی سنبه

٨- مقایسه نتایج حاصل از آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی برای جنس پلاستیسین

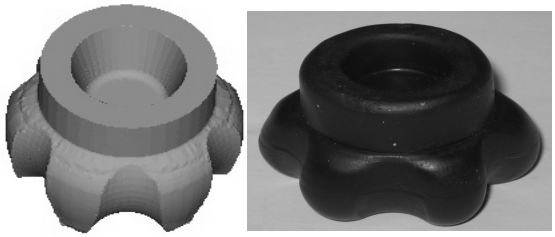
در شکلهای٢٩ تا ٣١ قطعات تولید شده توسط مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی به‌ترتیب در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

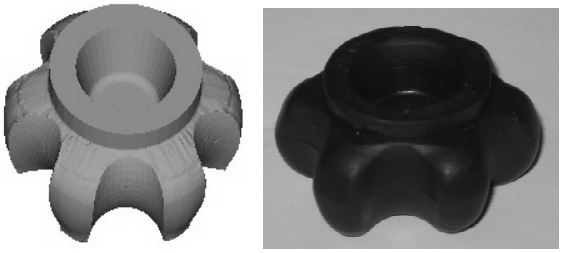
کورس‌های جابه‌جایی ٦٥، ٨٥ و ١٠٠ درصد نشان داده شده است.

در ٦٥٪ کورس جابه‌جایی بر طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، پره‌ها و شیارها تا حدودی شکل گرفته و در قسمت بالای پره‌ها، لبه‌های قطعه دارای شعاع انحنای زیادی است. در مدل‌سازی فیزیکی نیز همان‌طور که انتظار داشتیم، نحوه شکل گیری پره‌ها و شیارها و همچنین شعاع انحنای لبه‌های قطعه، مشابه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی است.



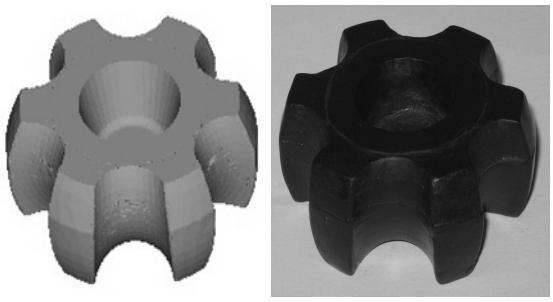
شکل ٢٩ قطعه تولید شده در٦٥٪ کورس جابه‌جایی توسط الف) مدل‌سازی فیزیکی ب) شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی مدل در ٨٥٪ کورس جابه‌جایی نشان می‌دهد که پره‌ها و شیارها تا حد زیادی شکل گرفته و شعاع انحنای لبه‌های بالای قطعه نیز نسبت به کورس ٦٥٪ کمتر شده اما هنوز به مقدار نهایی خود نرسیده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیکی نیز بیانگر این موضوع است.



شکل ٣٠ قطعه تولید شده در٨٥٪ کورس جابه‌جایی توسط الف) مدل‌سازی فیزیکی ب) شبیه‌سازی عددی

در مجموع همانطور که انتظار داشتیم در ١٠٠٪ کورس جابه‌جایی در شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی، شکل نهایی پره‌ها و شیارها، کامل شده و تمامی گوشه‌ها و لبه‌های قطعه به طور کامل پر شده‌اند.



شکل ٣١ قطعه تولید شده در١٠٠٪ کورس جابه‌جایی توسط الف) مدل‌سازی فیزیکی ب) شبیه‌سازی عددی

در جدول٣ مقایسه نیروی شکلدهی به‌دست آمده در آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است.

پرس هیدرولیک مورد استفاده در آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی، مجهز به نیروسنج بوده و نیروی مورد نیاز برای شکلدهی، توسط آن اندازه‌گیری شده است. نیروی به‌دست آمده توسط شبیه‌سازی عددی نیز بر طبق نمودار شکل ١٩ مشخص شده است.

جدول ٣ مقایسه نیروی شکلدهی برای جنس پلاستیسین توسط مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی

نیروی به‌دست آمده در آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی به‌جز نیروی فشردن فنر	١/٨ (Ton)
نیروی به‌دست آمده در شبیه‌سازی عددی	١/٦٥٤ (Ton)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

$$\text{درصد خطا} = \frac{1.8-1.654}{1.654}\times 100 = 8.8\%$$

با توجه به درصد خطای به‌دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مقایسه نیروی شکلدهی به‌دست آمده در مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

همان‌طور که در شکل۲۲ نشان داده شد، توزیع دما در نقاط مختلف قطعه در شبیه‌سازی عددی تقریباً یکنواخت بوده و دمای قطعه نهایی تغییر چندانی نداشته است. در آزمایش مدل‌سازی فیزیکی نیز در انتهای فرایند شکلدهی، تغییری در دمای قطعه نهایی مشاهده نشد؛ بنابراین از نظر توزیع دما، شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی، مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

۹- نتیجه‌گیری

• نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایش مدل‌سازی فیزیکی تطابق خوبی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طراحی ابزار برای این فرایند و همچنین جریان مواد داخل حفره قالب به طور صحیحی انجام شده است.

• تولید قطعه گردویی در فرایند فورج دقیق با استفاده از قالب دو نیمه قابل تولید است که استفاده از این روش راندمان تولید را بسیار بالا می‌برد. لذا در بازار رقابتی امروز بسیار باصرفه‌تر بوده و توجیه‌پذیر است.

• عملکرد خوب قالب در شکلدهی قطعات نشان می‌دهد که استفاده از روشهای CAD/CAM در طراحی قالب بسیار مفید بوده و از بروز بسیاری از خطاها جلوگیری می‌کند.

• با تغییر در هندسه قطعه گردویی می‌توان از ساختار فنری و پرس ساده به جای ساختار قالب چند تکه و پرس چند کاره استفاده کرد که این باعث کاهش چشمگیری در هزینه تولید قطعه می‌شود.

۱۰- مراجع

[1] ASM Handbook; “Forming And Forging”, 10th edition, vol.14, 1992

[۲] رحمانیان مجید، «تجزیه و تحلیل و تدوین دانش فنی طراحی مفصل انتقال قدرت شپا»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۰

[3] Onodera Sh., Sawai K.; "Current cold-forging techniques for the manufacture of complex precision near-nat shapes", J. Materials processing Tech, Vol.35, 1992, pp385-396

[4] Vazquez V., Sweeney K.; Wallace D., Wolff Ch., Ober M., Altan T.; "Tooling and process design to cold forging a cross groove inner race for a constant velocity joint-physical modeling and FEM process simulation", J. Materials processing Tech, Vol.59, 1996, pp144-157

[5] Vazquez V., Altan T.; "New concepts in die design-physical and computer modeling applications", J. Materials processing Tech, Vol.98, 2000, pp 212-223

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]

[6] Doege E., Bohnasack R.; "Closed die technologies for hot forging", J. Materials processing Tech, Vol.98, 2000, pp165-170

[7] Sofuoglu H., Rasty J.; "On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test", Tribology International, Vol.32, 1999, pp327-335

[8] Sofuoglu H., Rasty J.; "Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes", Tribology International, Vol.33, 2000, pp523-529

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.1.6.7]