

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.

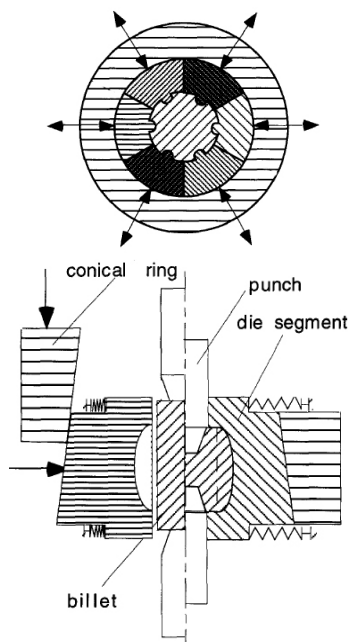
۱- مقدمه

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، هزینه‌ها و رسیدن به خواص مکانیکی و متالورژیکی

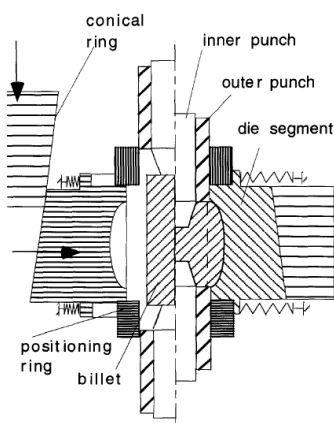
بهرتر و کاستن از عملیات ماشینکاری است که این باعث دستیابی به روش فورج دقیق^۱ شده است [۱]. تعداد زیادی از قطعات، طرح هندسی نامتقارن و بسیار پیچیده‌ای دارند. روشهای فورج سنتی همیشه قابلیت تولید قطعات پیچیده را ندارند؛ بنابراین چنین قطعاتی توسط فرآیندهایی که نیاز به عملیات ماشینکاری زیادی دارند، تولید می‌شوند که این هزینه تولید را بالا می‌برد.

1. Precision Forging

چند تکه استفاده شده که در آن بعد از فرایند شکل‌دهی، تکه‌های قالب از هم جدا شده و قطعه به‌راحتی از قالب خارج می‌شود [۴]. 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.

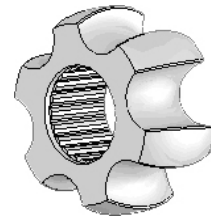


شکل ۲ مکانیزم پانچ ساده [۴]



شکل ۳ مکانیزم پانچ دو کاره [۴]

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 ۴ تا ۸ 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.

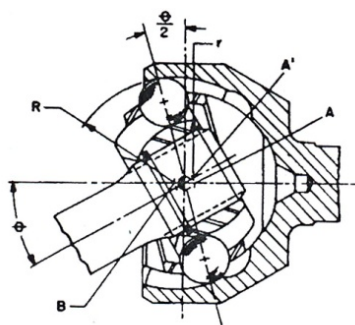
در سال ۱۹۹۲ کینچی و اوندرا. قطعه گردویی را تا حدودی نزدیک به حالت نهایی^۱ در طی چند مرحله با استفاده از فرایند فورج سرد تولید کرده‌اند. قطعه نهایی فورج شده، به عملیات ماشینکاری نسبتاً زیادی نیاز داشت [۳].

در سال ۱۹۹۶ 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

1. Near Net Shape

تحمیل 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 شکل ۴ نمایی از پلوس با زاویه انحراف θ ، نشان داده شده است.



شکل ۴ نمایی از پلوس شپا با زاویه انحراف θ [۲]

محفظة 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 ۵ نمای دو بعدی قطعه گردویی در حالت بدون هزار خار داخلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، $C1$ مرکز سطح خارجی قطعه یا مرکز مفصل و $C2$ مرکز دایره شیار قطعه است که به

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 [۴] 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 جزئی در هندسه قطعه صورت می‌گیرد که این باعث می‌شود قطعه به راحتی 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 به عنوان واسطه‌ای برای انتقال گشتاور یا حرکت دورانی از محوری به محور دیگر به کار می‌روند. یکی از انواع مفاصل انتقال قدرت، مفصل سرعت ثابت^۱ 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

1. Constant Velocity Joint

- سنگ‌زنی بر روی سطح شیارهای قطعه، به‌منظور دستیابی به کیفیت مطلوب سطح.

۴- 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 ۴-۸ 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.

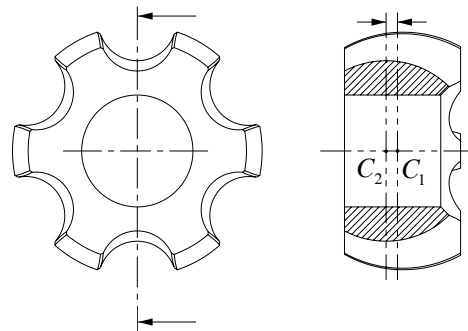
- در فرایند فورج سرد قطعه گردویی، به‌دلیل افزایش کارسختی، معضل عدم تغییر شکل‌پذیری و پرنشدن گوشه‌ها و لبه‌های قالب وجود دارد.

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

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.



شکل ۵ نمای برش خورده قطعه گردویی

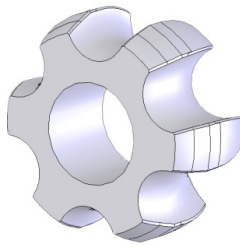
لازم است ذکر شود که سطوح شیارهای قطعه به علت تحمل بیشترین تنش‌های سایشی و سیکلی، بحرانی‌ترین و حساس‌ترین قسمت قطعه گردویی، است [۲].

۳- ساخت قطعه گردویی پلوس

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

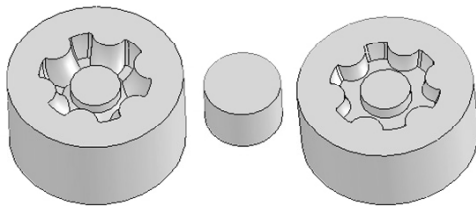
- برطرف کردن پوسته‌های سطح میله بیلت برای کنترل دقیق حجم.
- بریدن بیلت از یک میله طولانی سرد.
- فرایند فورج سرد.
- سوراخکاری مرکز قطعه و ایجاد هزارخار و ماشین‌کاری سطوح خارجی قطعه.
- عملیات حرارتی کربورایزینگ^۱

1. Carburizing



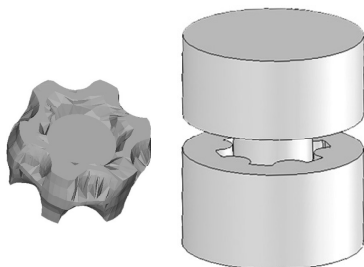
شکل ۷ نمای سه بعدی قطعه پس از تغییر هندسه

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. شکل ۸ نمای سه‌بعدی نیمه‌های قالب و بیلت اولیه را نشان می‌دهد.



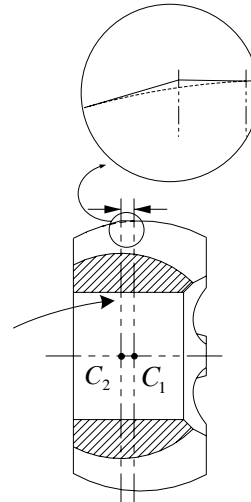
شکل ۸ نمای سه‌بعدی نیمه‌های قالب و بیلت اولیه

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



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

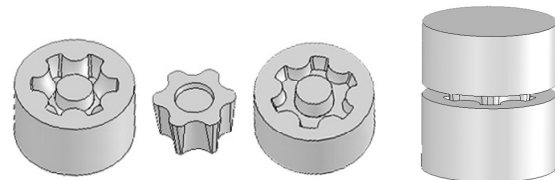
قالب ناممکن می‌سازد. در نتیجه برای خروج قطعه از قالب، تغییری را در هندسه قطعه ایجاد کرده و به صورت زیر عمل می‌کنیم (شکل ۶):



شکل ۶ نحوه تغییر شکل هندسی قطعه گردویی

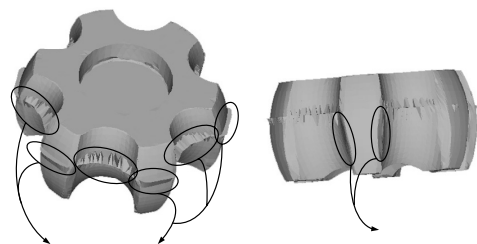
همان‌طور که اشاره شد، بحرانی‌ترین و حساس‌ترین قسمت قطعه گردویی، سطوح شیارهای آن است. بنابراین طراحی قالب باید به نحوی صورت گیرد که شیارهای این قطعه حتی‌الامکان به شکل نهایی مورد نظر تولید شود. در نتیجه محل خط جدایش حفره‌های قالب، در روی مرکز مسیر شیارها و در روی بیشترین قطر شیار انتخاب می‌شود؛ در این 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، به راحتی در عملیات ساده ماشین‌کاری حذف می‌شود. شکل ۷ نمای سه‌بعدی قطعه گردویی را پس از تغییر هندسه نشان می‌دهد.

بنابراین نتیجه گرفته شد که برای راحت‌تر پرس 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.

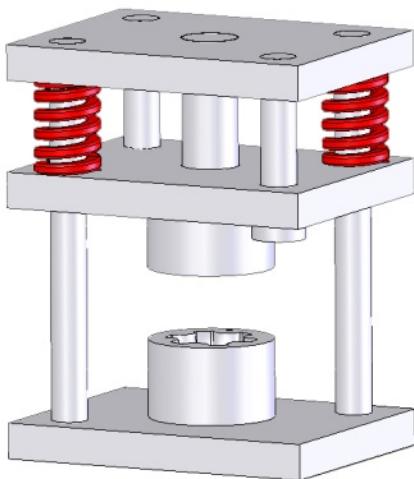


شکل ۱۱ قطعه شکل گرفته با استفاده از پیش‌فرم

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 این صورت، قالب فورج به دو نیمه بالا و پایین تقسیم می‌شود و بیلست 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 بیلست استوانه‌ای به اطراف جریان پیدا کرده و قالب پر می‌شود. در شکل ۱۲ نمای سه‌بعدی قالب طراحی شده برای آزمایش مدل‌سازی فیزیکی، نشان داده شده است.

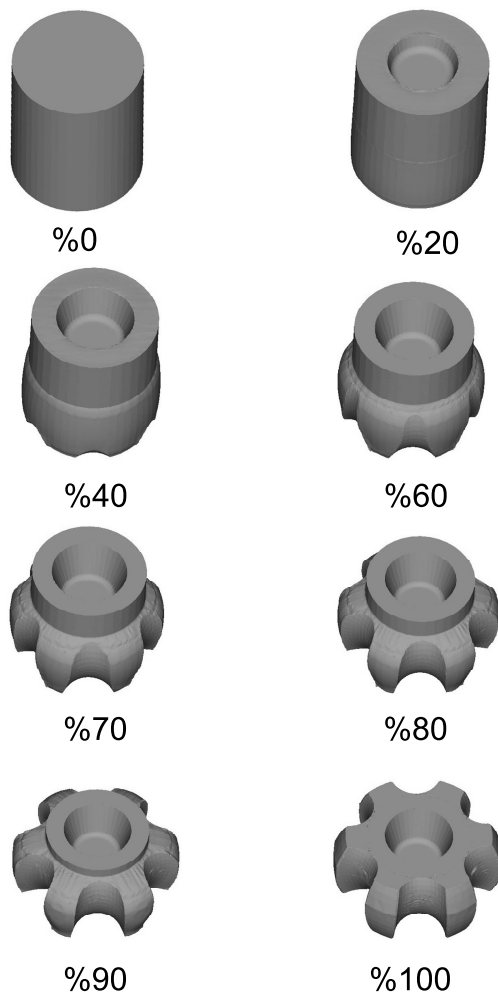


شکل ۱۲ ساختار فیزی طراحی شده برای مدل‌سازی فیزیکی

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 شکلهی 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 بیلست 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 شکلهی کامل می‌شود. پس از پرس

شکل ۱۳ نحوه شکل گیری قطعه را در کورس های مختلف جابه جایی سنبه، با درصدهای ذکر شده نشان می دهد. همان طور که در شکلها مشاهده می شود، نحوه شکلدهی فرایند به صورت کویش انجام شده و جریان مواد داخل حفره قالب به صورت عرضی بوده و گوشه ها و لبه های قطعه در آخرین مرحله کامل شده و پر می شوند.



شکل ۱۳ نحوه شکل گیری قطعه در کورس های مختلف جابه جایی سنبه

شکل ۱۴ نمای دو بعدی شکل گیری قطعه گردویی را نشان می دهد.

شدن قالب و رسیدن سنبه به پایان حرکت خود، فشار از روی قالب برداشته می شود. در این صورت فنرها باز شده و سنبه از داخل حفره قالب خارج می شود. سپس با بالاتر رفتن رم^۱ پرس، میله های رابط باعث می شوند که نیمه های 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، نیمه های قالب از هم باز شده و مواد از اطراف آن خارج و باعث خرابی قالب می شود [۶].

۶- شبیه سازی عددی به روش FVM^۲

در این مقاله، فرایند شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار super forge برای دو جنس مختلف انجام شده است:

- جنس AISI ۱۰۵۰ که به عنوان جنس اصلی قطعه گردویی انتخاب شده است.
 - جنس پلاستیسین که به عنوان جنس قطعه برای آزمایشهای مدل سازی فیزیکی انتخاب شده است.
- جدول ۱ شرایط شبیه سازی سه بعدی (FVM) را برای AISI ۱۰۵۰ نشان می دهد.

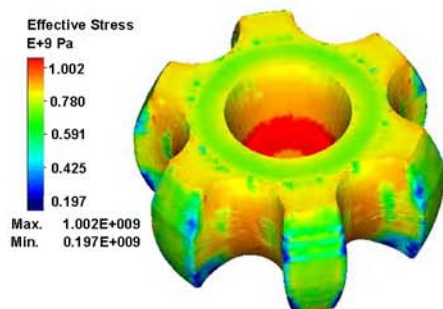
جدول ۱ شرایط شبیه سازی سه بعدی (FVM) را برای جنس

AISI ۱۰۵۰ [۴]

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

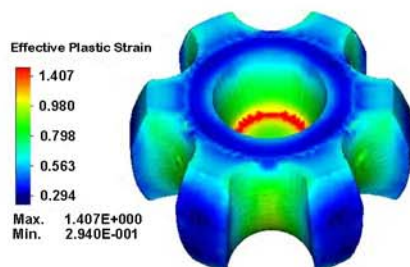
1. Ram
2. Finite Volume Method

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.



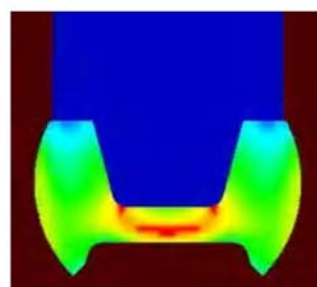
شکل ۱۶ توزیع تنش مؤثر در پایان فرایند شکلدهی

شکل ۱۷ 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.



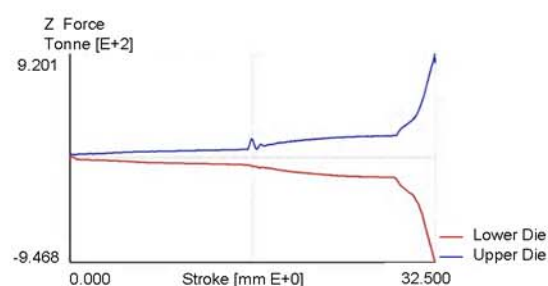
شکل ۱۷ توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در پایان فرایند

شکل ۱۸ 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.



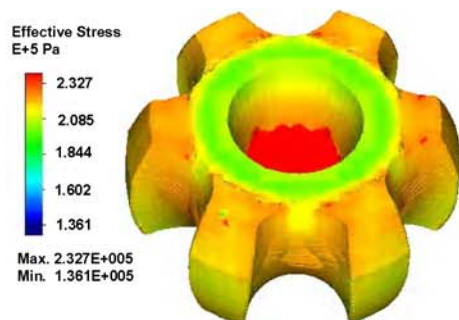
شکل ۱۴ نمای دو بعدی شکل‌گیری قطعه گردویی

شکل ۱۵ 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 ۹۲۰ تن به‌دست آمده است.

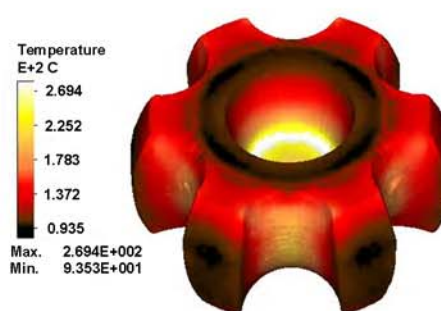


شکل ۱۵ نحوه شکل‌گیری قطعه در کورس‌های مختلف جابه‌جایی سنبه

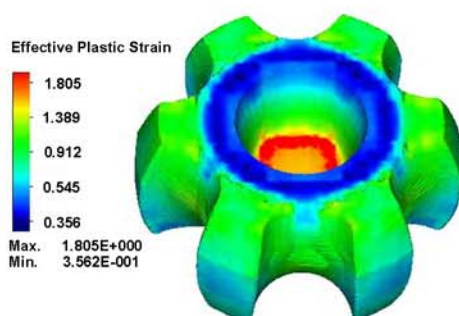
شکل ۱۶ توزیع تنش مؤثر در انتهای فرایند شکلدهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با صرف‌نظر کردن از راهگاه قطعه، که بحرانی‌ترین قسمت قطعه در فرایند شکلدهی است - سطوح شیارهای قطعه گردویی در مقایسه با دیگر سطوح قطعه، تحت تنش بیشتری قرار گرفته است. علت آن است که مواد داخل حفره قالب پس از رسیدن به سطوح شیارها، بیشترین



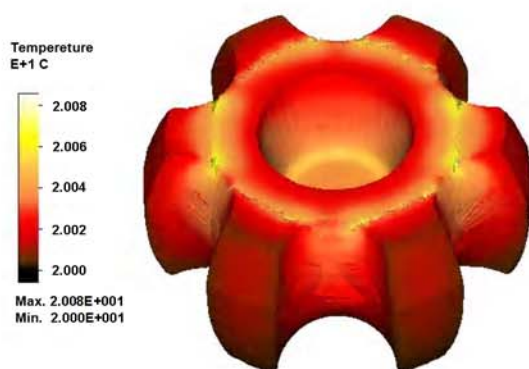
شکل ۲۰ توزیع تنش مؤثر در پایان فرایند شکلدهی برای پلاستیسین



شکل ۱۸ توزیع دمای قطعه گردویی در پایان فرایند شکلدهی



شکل ۲۱ توزیع کرنش پلاستیکی مؤثر در پایان مرحله برای پلاستیسین



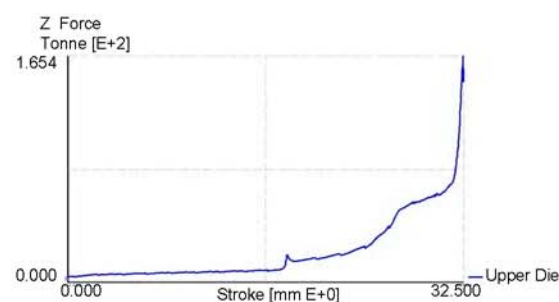
شکل ۲۲ توزیع دمای قطعه گردویی، در پایان فرایند شکلدهی برای ماده پلاستیسین

جدول ۲ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی (FVM) را برای جنس پلاستیسین نشان می‌دهد.

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

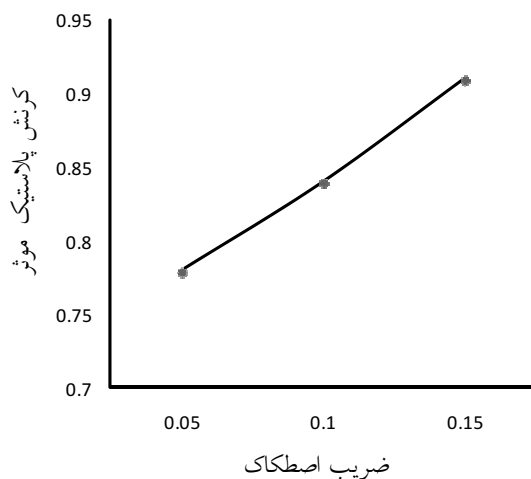
جدول ۲ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی (FVM) برای جنس پلاستیسین [۷ و ۸]

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



شکل ۱۹ نمودار تغییرات نیرو - جابه‌جایی برای 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



اصطکاک، تغییرات نیروی شکلهی بر طبق شکل ۲۳ برای تولید قطعه گردویی با جنس AISI 1050 بررسی شده است. همان‌طور که انتظار داشتیم، با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی شکلهی افزایش می‌یابد.

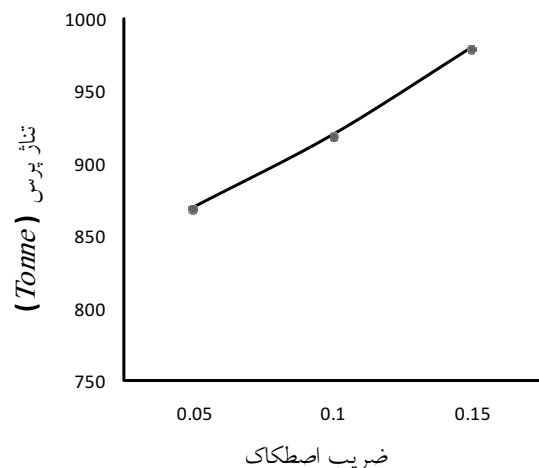
در شکل ۲۴ و ۲۵ تأثیر ضریب اصطکاک بر تنش و کرنش پلاستیک مؤثر نشان داده شده است. با افزایش ضریب اصطکاک، جریان مواد بر روی سطوح قالب، دشوارتر می‌شود. در نتیجه تنش و کرنش پلاستیک مؤثر افزایش می‌یابد.

شکل ۲۵ تغییرات کرنش پلاستیک مؤثر بر حسب ضریب اصطکاک

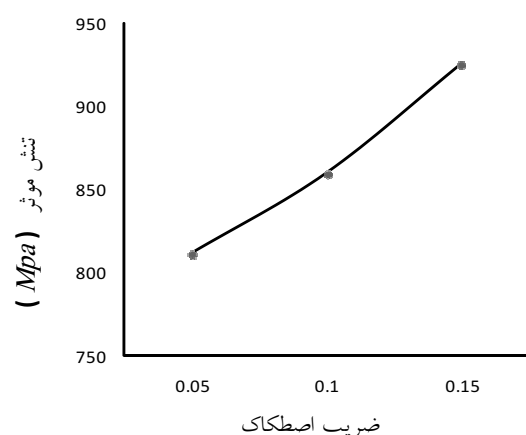
۷- آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی

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



شکل ۲۳ تغییرات تناژ پرس بر حسب ضریب اصطکاک



شکل ۲۴ تغییرات تنش مؤثر بر حسب ضریب اصطکاک



شکل ۲۷ قطعه نهایی داخل حفره قالب پس از تغییر شکل زیر پرس هیدرولیک



شکل ۲۸ نحوه شکل گیری قطعه گردویی در کورس های مختلف جابه جایی سنبه

۸- مقایسه نتایج حاصل از آزمایشهای مدل سازی فیزیکی و شبیه سازی عددی برای جنس پلاستیسین

در شکل های ۲۹ تا ۳۱ قطعات تولید شده توسط مدل سازی فیزیکی و شبیه سازی عددی به ترتیب در

فرایند فلز اصلی، انتخاب شرایط اصطکاک بین قطعه کار و قالب، باید بسیار نزدیک به فرایند واقعی صورت گیرد. بنابراین انتخاب روانکار مناسب، برای آزمایش مدل سازی فیزیکی، برای دستیابی به جریان صحیح مواد، بسیار بحرانی و مهم است. روانکارهای مورد استفاده در آزمایشهای مدل سازی فیزیکی توسط پلاستیسین به صورت زیر است [۴] و [۸]:

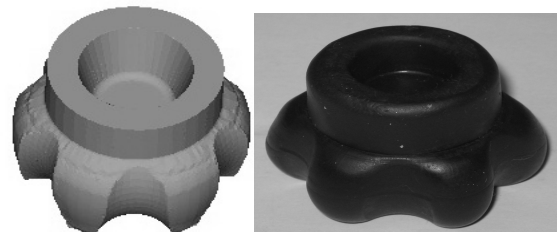
مخلوط گلیسرین و آب صابون، وازلین، گریس و... در این آزمایش - با توجه به پیچیدگی شکل هندسی قطعه و مکانیزم قالب، روانکار گریس بهتر جواب داده است. شکل های ۲۶ تا ۲۸ قالب مربوط به انجام آزمایشهای مدل سازی فیزیکی را همراه با قطعات تولید شده نشان می دهد.



شکل ۲۶ بیلت اولیه داخل قالب قبل از تغییر شکل زیر پرس هیدرولیک

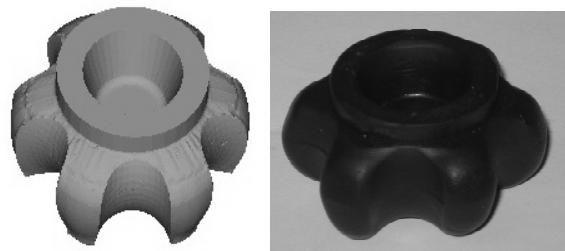
کورس‌های جابه‌جایی ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نشان داده شده است.

در ۶۵٪ 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 انحنا زیادی است. در مدل‌سازی فیزیکی نیز همان‌طور که انتظار داشتیم، نحوه شکل‌گیری پره‌ها و شیارها و همچنین شعاع انحنا لبه‌های قطعه، مشابه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی است.



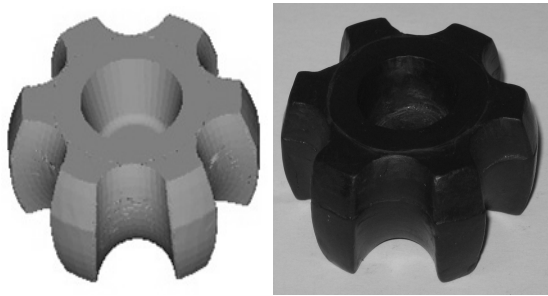
شکل ۲۹ قطعه تولید شده در ۶۵٪ کورس جابه‌جایی توسط (الف) مدل‌سازی فیزیکی (ب) شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی مدل در ۸۵٪ کورس جابه‌جایی نشان می‌دهد که پره‌ها و شیارها تا حد زیادی شکل گرفته و شعاع انحنا لبه‌های بالای قطعه نیز نسبت به کورس ۶۵٪ کمتر شده اما هنوز به مقدار نهایی خود نرسیده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیکی نیز بیانگر این موضوع است.



شکل ۳۰ قطعه تولید شده در ۸۵٪ کورس جابه‌جایی توسط (الف) مدل‌سازی فیزیکی (ب) شبیه‌سازی عددی

در مجموع همان‌طور که انتظار داشتیم در ۱۰۰٪ 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 ۳۱ قطعه تولید شده در ۱۰۰٪ کورس جابه‌جایی توسط (الف) مدل‌سازی فیزیکی (ب) شبیه‌سازی عددی

در جدول ۳ 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 ۱۹ مشخص شده است.

جدول ۳ مقایسه نیروی شکلدهی برای جنس پلاستیسین توسط مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی

نیروی به‌دست آمده در آزمایشهای مدل‌سازی فیزیکی به‌جز نیروی فشردن فنر	$1/8 \text{ (Ton)}$
نیروی به‌دست آمده در شبیه‌سازی عددی	$1/754 \text{ (Ton)}$

• با تغییر در هندسه قطعه گردویی می توان 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 می شود.

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»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۰
- [3] Onodera Sh., Sawai K.; "Current cold-forging techniques for the manufacture of complex precision near-net 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

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

با توجه به درصد خطای به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که مقایسه نیروی شکلدهی به دست آمده در مدل سازی فیزیکی و شبیه سازی عددی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

همان طور که در شکل ۲۲ نشان داده شد، توزیع دما در نقاط مختلف قطعه در شبیه سازی عددی تقریباً یکنواخت بوده و دمای قطعه نهایی تغییر چندانی نداشته است. در آزمایش مدل سازی فیزیکی نیز در انتهای فرایند شکلدهی، تغییری در دمای قطعه نهایی مشاهده نشد؛ بنابراین از نظر توزیع دما، شبیه سازی عددی و مدل سازی فیزیکی، مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

۹- نتیجه گیری

• نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی تطابق خوبی دارد. بنابراین می توان 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 می برد. لذا در بازار رقابتی امروز بسیار باصرفه تر بوده و توجیه پذیر است.

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

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

[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