مجلهٔ فنی و مهندسی مدرس
شمارهٔ ۳۲، تابستان ۱۳۸۷
«ویژه‌نامهٔ مهندسی مکانیک»

«یادداشت تحقیقاتی»

طراحی پارامتری، طراحی و ساخت قالبهای فورج دقیق چرخدنده هرزگرد پژو ٤٠٥ با استفاده از CAD/CAM

محمدحسین صادقی[۱*]، علی خسروی[۲]

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

***صندوق پستی ١٤١١٥/١٤٣، تهران، ایران**
sadeghi@modares.ac.ir
(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: خرداد ١٣٨٦)

چکیده- فناوری طراحی پارامتری، در پاسخ به نیاز مهندسان طراح و با اطلاع از فرایند تکراری حاکم بر عملیات طراحی و مهندسی محصولات و آزمایش، خطاهای احتمالی و اصلاحات مکرر محصول تا رسیدن به مرحله تولید انبوه به‌وجود آمده است. برای قطعات یک خانواده و قطعاتی با هندسهٔ یکسان اما با ابعاد مختلف، مانند فنرها، پیچها، بلبرینگها، مهره‌ها و چرخدنده‌ها استفاده از طراحی پارامتری با CAD/CAM بسیار مفید است و طراح می‌تواند با طراحی پارامتری، تمامی قطعات هم‌خانواده را با واردکردن پارامترهای لازم ایجاد کند. به‌دلیل وجود کانتورهای پیچیده و دقت بالایی که دندانه‌های چرخدنده نیاز دارند، ساخت این قطعه بسیار تخصصی بوده و با روشهای ماشینکاری سنتی، مستلزم صرف زمان و هزینه بسیار است. طراحی و تولید این چرخدنده‌ها با استفاده از فرایند فورج دقیق، در مقایسه با روشهای سنتی، باعث صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در مواد خام اولیه، زمان تولید و نیز بهبود خواص مکانیکی می‌شود. در این تحقیق، نمونه‌ای از چرخدنده هرزگرد ساده، به‌صورت پارامتری طراحی و قالبهای فورج دقیق آن با روش CAD/CAM، طراحی، تحلیل و ساخته شده است.

کلید واژگان: CAD/CAM، طراحی پارامتری، فورج دقیق، چرخدنده هرزگرد.

۱- مقدمه

طراحی و ساخت چرخدنده‌های هرزگرد ساده جعبه‌دنده به روش سنتی، توأم با سعی و خطای فراوان بوده و مستلزم زمان و هزینه زیادی است. به‌کارگیری فناوریهای جدیدی مانند CAD/CAM، باعث افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری فرایند می‌شود. در این پروژه، پارامترها و ویژگیهای مختلف فرایند طراحی پارامتری چرخدنده‌های هرزگرد ساده جعبه‌دنده با استفاده از CAD/CAM، مورد بحث قرار گرفته و روشی برای

طراحی پارامتری آنها ارائه شده است. با استفاده از این روش، طراحی قطعات هم‌خانواده صنعتی را در کمترین زمان می‌توان انجام داد و علاوه بر آن با وارد کردن پارامترهای قطعه جدید، به نمونه موردنظر دست پیدا کرد. به‌دلیل کانتورهای پیچیده و نیاز به دقت بالا در دندانه‌های چرخدنده، ساخت این قطعه بسیار تخصصی بوده و با روشهای ماشیکاری سنتی، مستلزم صرف زمان و هزینه بسیاری است.

میزان دورریز مواد نیز یکی از دیگر مشکلات این فرایندها است. در سالهای اخیر، توجه زیادی به تولید چرخدنده‌ها با استفاده از روش فورج دقیق شده و این فرایند به تولید دندانه‌هایی با تلرانس‌های نهایی منجر می‌شود که در مقایسه با روشهای سنتی ماشینکاری، موجب صرفه‌جویی در مواد خام اولیه، زمان تولید و نیز خواص مکانیکی بهبود یافته دندانه‌ها می‌شود.

در مقابل، فورج دقیق چرخدنده‌ها با مشکلاتی در رابطه با طراحی قالب، هندسه و حجم پیش‌فرم، دقت ابعادی دندانه، ارزیابی نیرو و انرژی لازم، مشکلات بیرون‌اندازی قطعه و نیز عمر کارکرد قالب، همراه است.

۲- مرور کارهای انجام شده در زمینه فورج دقیق چرخدنده

هدف از فورج دقیق، تولید قطعاتی با کیفیت بالای سطوح کاری است. یعنی سطوح به‌صورت نهایی یا نزدیک به نهایی به‌دست می‌آیند و نیاز به عملیات ماشینکاری به حداقل می‌رسد. از طرف دیگر به فورجینگ دقیق، فورج با قالب بسته نیز می‌گویند؛ یعنی در فورج دقیق، پلیسه‌ای وجود نداشته یا حداقل است.

دین[1] در مطالعاتی که بر روی دو قطعه مدور انجام داد، نشان داد که با حذف پلیسه، نه تنها از اتلاف مواد جلوگیری می‌شود بلکه باعث افزایش عمر قالب (بیشترین سایش در گلوگاه پلیسه اتفاق می‌افتد)، بالاتر بردن دقت ابعادی و تلرانس‌های محصول، حذف عملیات پلیسه‌زدایی و به حداقل رساندن عملیات ماشینکاری می‌شود. پس از جنگ جهانی دوم، فورج دقیق چرخدنده‌ها در آلمان غربی پایه‌گذاری و به دنبال آن در این کشور از روش‌های طراحی کامپیوتری برای طراحی قالبهای آهنگری دقیق استفاده و چرخدنده‌هایی ساخته شدند. در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی، آلتان[2] طراحی را برای روش ساخت به‌کمک کامپیوتر در آهنگری عرضه کرد. از نظر وی در حالت ایدئال، سیستم طراحی به‌کمک کامپیوتر باید بتواند با استفاده از تشریح سه‌بُعدی قطعه ماشینکاری شده، قطعه آهنگری نهایی را به‌صورت سه‌بُعدی طراحی کند. لیکن به‌دلیل پیچیده بودن چنین کاری، فرایند طراحی، در عمل بر روی سطح دوبُعدی انتخاب شده انجام شده است.

وی در مقاله خود به اهمیت شبیه‌سازی کامپیوتری فرایند آهنگری در طراحی بهینه قالب اشاره می‌کند. در سال۱۹۸۲، آلتان یک سیستم طراحی و ساخت به‌کمک کامپیوتر را برای فرایند آهنگری دقیق چرخدنده‌ها ارائه کرد. دکتر صادقی در تحقیقات جدید خود، فرایند فورج چرخدنده ساده را به‌صورت ریاضی مدلسازی کرد و نتایج حاصل از آن را در تأثیر پارامترهای مختلف هندسی چرخدنده، با نتایج تجربی به‌دست آمده در آزمایشها، مقایسه و ارزیابی کرده است [۱].

۳-کاربرد CAD/CAM در فرایند ساخت قالبهای قطعات پیچیده

کاربرد CAD/CAM به طراح اجازه می‌دهد تا با به‌کارگیری توانایی کامپیوتر در محاسبات، زمان و هزینه را

1. Dean

2. Altan

به حداقل رسانده و بدون متحمل شدن هزینه‌های بالای ساخت قالب و احتمال بروز مشکلات بعدی، قبل از اقدام به ساخت قالب، پیش‌بینیهای لازم انجام شود. کارهایی که در زمینه طراحی قالب با روشهای CAD/CAM انجام می‌شود عبارتند از:

- طراحی مدل سه‌بُعدی قطعه نهایی و پیش‌فرم‌ها، مدل دو نیمه قالب و مجموعه مونتاژی قالب.
- شبیه‌سازی سازوکارحرکت اجزای قالب.
- شبیه‌سازی و تحلیل فرایند شکل‌دهی قطعه در داخل قالب با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف فرایند، مانند ضریب اصطکاک، دما، جنس قالب و سرعت حرکت ابزار.
- دستیابی به نتایج مورد نیاز و ضروری از تحلیل فرایند در راستای اجرا و عملی کردن فرایند و مقایسه آنها با نتایج تجربی موجود.

٤- طراحی پارامتری

CAD/CAM یکی از فناوریهای جدید و امروزی است که در بیشتر کارخانجات صنعتی و مؤسسات علمی و تحقیقاتی پیشرفته، از آن استفاده می‌شود. در حالت کلی، CAD به فرایندی گفته می‌شود که در آن از بسته‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری کامپیوتر برای انجام عملیات طراحی استفاده می‌شود.

متداولترین ابزار CAD، نرم‌افزار AUTOCAD است، اما در سالهای اخیر نرم‌افزارهای قدرتمندی مانند SOLIDWORKS، برای مدلسازی کامپیوتری به بازار عرضه شده که عملیات مدلسازی، مونتاژپذیری و تولید نقشه‌های ساخت را به‌طور خودکار انجام داده و بهره‌وری فرایند طراحی و انعطاف‌پذیری فعالیتها را به میزان چشمگیری افزایش می‌دهند. CAM عبارت است از کاربرد مؤثر نرم‌افزار و سخت‌افزار کامپیوتر در فعالیتهای مختلف ساخت و تولید کارخانه (به‌صورت ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم کامپیوتر با بخشهای مختلف تولید) که هدف نهایی آن افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری در تولید است. امروز نرم‌افزارهای قدرتمندی مانند Mastercam و Edgecam در این زمینه به بازار عرضه شده که ساخت قطعات و قالبهای پیچیده را امکان‌پذیر می‌سازند. یکی از قطعات پر استفاده در خودروها، چرخدنده‌های هرزگرد است. با توجه به تنوع خودروها و چرخنده‌های آنها، چرخدنده‌های هرزگرد نیز با توجه به نوع خودرو، در ابعاد و اندازه‌های مختلفی باید تولید شوند که مستلزم طراحی جداگانه برای هر نمونه است. از آنجاکه این چرخدنده‌ها از نظر شکل و قیافه، شبیه به یکدیگرند و فقط بعضی از جزئیات آنها تفاوت دارند، لذا می‌توان آنها را در یک خانواده قرار داد. طراحی این چرخدنده‌ها به روش سنتی، بسیار وقتگیر و مشکل‌ساز بوده و همزمان با پیشرفت CAD/CAM، طراحی دستی جای خود را به طراحی کامپیوتری داده است. از آنجاکه طراحی برای هر نمونه نیز به وقت نسبتاً زیادی نیاز داشت و در حین فرایند تولید نیز امکان تغییر در طرح وجود داشت، بحث طراحی پارامتری مطرح شد تا به‌کمک CAD/CAM، تغییرات طرح در کوتاهترین زمان صورت گیرد و به طراحی مجدد نیاز نباشد.

٤-١- طراحی پارامتری چرخدنده هرزگرد ساده

برای قطعات یک خانواده و قطعات با هندسهٔ یکسان اما با ابعاد مختلف، مانند فنرها، پیچ‌ها، بلبرینگها، مهره‌ها و چرخدنده‌ها، روش طراحی پارامتری، بسیار مفید است. در این روش، طراح می‌تواند با طراحی یک نمونه از قطعات هم‌خانواده، و با وارد کردن پارامترهای جدید، به نمونه موردنظر دست پیدا کند. برای طراحی پارامتری می‌توان از

نـرم‌افزارهـای مدلـسازی مختلفـی ماننـد Solidworks استفاده کرد که در آن امکان طراحی و مدلـسازی قطعـات به‌صورت پارامتری وجود دارد. از آنجاکـه قطعـه‌ای ماننـد چرخدنده هرزگرد ساده، ابعاد مختلفی دارد که در ارتبـاط با یکدیگر بوده و این ارتباط خـاص، هندسـه قطعـه و در نتیجه عملکرد درست آن را ایجاد می‌کنـد، بایـد بتـوان بـا استفاده از نرم‌افزار، این قیود را بـین ابعـاد آن بـه‌صـورت پارامتری و بر طبق اصول طراحی، برقرار سـاخت. سـپس فقط با وارد کردن و تغییر در ابعاد خاصی که طراحـی بـر اسـاس آنهـا انجـام شـده، بـه خـانواده‌ای از قطعـات بـا توپولوژی یکسان و ابعـاد مختلـف دسـت پیـدا کـرد. در نرم‌افزار Solidworks ، این کار به چند روش قابل انجـام است که عبارتند از:

۱- استفاده از بخش Table در Toolbar نرم‌افزار:

در این حالت می‌توان با ایجاد جدولی مرتبط با هندسه قطعه‌کار به‌صـورت جـدول Excel، بـرای ابعـاد مختلـف نامگذاری کرده و آنها را به‌صورت دلخواه تغییر داد.

۲- استفاده از بخش Equations در Toolbar نرم‌افزار:

در این حالت فقط می‌توان بین ابعاد مختلف قطعـه‌کـار کـه بـا نامهـای مختلفـی مـشخص شـده، رابطـه ریاضـی مشخصی را برقرار ساخت که این رابطـه فقـط مـی‌توانـد رابطه‌ای ساده باشد. به این طریق و به‌صورت بسیار سـاده، طراحی پارامتری برای قطعه ساده انجـام مـی‌شـود کـه بـا تغییر بعضی از ابعاد کلیدی پارامتری شده، بقیـه ابعـاد بـر اساس آنها تغییر کرده و لذا مدل تغییر خواهد کرد.

۳- نوشـتن برنامـه‌ای در نـرم‌افـزار Visual Basic و ارتباط دادن آن به نرم‌افزار Solidworks:

این روش که نسبت به روشهای دیگر بـسیار قدرتمنـدتر و دقیقتر است، این امکان را به کاربر می‌دهد که بتواند بـه‌راحتـی در یک پنجره طراحـی شـده از طریـق نـرم‌افـزار فـوق، کلیـه اطلاعات مورد نیاز برای طراحی و مدلسازی قطعه موردنظر را وارد کرده و در کوتاهترین زمـان ممکـن، قطعـاتی را بـا ابعـاد مختلف و هندسه یکـسان طراحـی و مدلـسازی کنـد. روابـط خاصی که در طراحی یک خانواده از قطعات، مورد نیاز است، در داخل برنامه به‌صورت پارامتری گنجانده شـده و نـرم‌افـزار Solidworks، فقط بر اساس روال برنامه طراحـی شـده، کـار مدلسازی طرح فوق را مرحله به مرحله انجام می‌دهد.

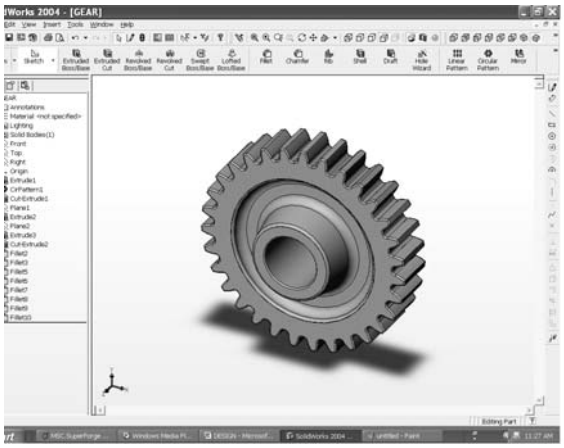
در دو روش پیشین، قدرت انعطاف‌پذیری طراحی پارامتری بـسیار کمتـر بـوده و فقـط مـدلهای سـاده‌ای از قطعـات بـا پروفیل‌های ساده را می‌توان طراحی و مدلسازی پارامتری کرد.

در طراحی پارامتری چرخدنده هرزگـرد موضـوع ایـن مقاله که ابعاد متعددی برای ارتباط‌دهی با یکدیگر داشته و نیز از پروفیل دندانه اینولـوت برخـوردار اسـت، از روش سوم استفاده شده است. برای این کار، در ابتدا پارامترهای مختلف چرخدنده که در طراحی آن مورد نیـاز اسـت، بـر اساس نقشه قطعه کار و مشخـصات درج شـده در نقـشه، تنظـیم و گـردآوری شـده اسـت. بـرای طراحـی پروفیـل اینولوت دندانه، بر طبق اسـتاندارد طراحـی چرخدنـده، از روابط موجود اسـتفاده و از ۲۰ نقطـه قرارگرفتـه در روی پروفیل، برای ترسـیم آن اسـتفاده شـده اسـت. طراحـی و مدلسازی پارامتری این نوع چرخدنده، بر طبق پارامترهای مربوط به استاندارد فرانسه انجـام شـده؛ یعنـی ابعـادی از چرخدنده به‌صورت پارامتری درآمده که در این اسـتاندارد گنجانده شده است. از آنجاکه این نوع چرخدنـده از نـوع ساده[1] اسـت، بعـد از طراحـی و مدلـسازی چرخدنـده در نرم‌افزار Solidworks، مـی‌تـوان بخـشهای اضـافی ایـن چرخدنـده هرزگـرد را از نمـودار درختـی Solidworks حـذف یـا بخـشهای دیگـری را بـه آن اضـافه کـرد و بدین‌طریق، طراحی و مدلسازی پارامتری را برای هر نـوع

1. Spur

چرخدنده ساده، مورد استفاده قرار داد. در شکل ۱، مدل طراحی شده توسط نرم‌افزار، بعد از طراحی پارامتری آورده شده است.

شکل ۲ پنجره در نظر گرفته شده از طریق برنامه‌نویسی با Visual Basic را برای وارد کردن پارامترهای چرخدنده موردنظر، مدلسازی آن در نرم‌افزار Solid Works نشان می‌دهد.



شکل ۱ چرخدنده ساده مدل شده از طریق طراحی پارامتری

شکل ۲ پنجره طراحی شده، برای وارد کردن پارامترهای چرخدنده هرزگرد ساده

۵- فرایند فورج دقیق چرخدنده

اصطلاح[1] یا فورج دقیق، فرایند را به‌صورت دقیق مشخص نمی‌کند اما می‌توان آن را حالت پیشرفته فورجینگ معمولی در نظر گرفت.

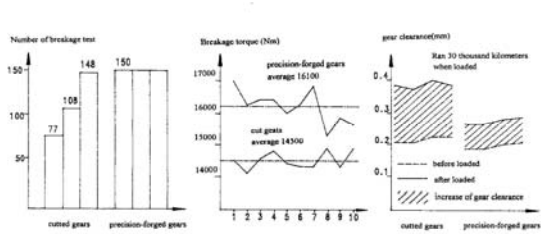
در این فرایند هدف تولید قطعه با شکل نهایی[2] یا نزدیک به شکل نهایی[3] در شرایط فورجینگ است. شکل نهایی یعنی این‌که بعد از فرایند فورج، عملیات ماشینکاری یا پرداخت روی سطوح لازم نیست؛ اما در نزدیک به شکل نهایی ممکن است برای ایجاد سوراخ، پرداخت سطوح یا ایجاد جزئیات دیگر، عملیات تکمیلی بعد از فرایند فورج نیاز باشد؛ یعنی تعدادی از سطوح در عملیات فورج در شکل نهایی نبوده و باید ماشینکاری شوند. فورج دقیق در بعضی موارد، فورج با تلرانس بسته نیز نامیده می‌شود.

۵-۱- مزایا و معایب فرایند فورج دقیق

الف) مزایا

- افزایش میزان تولید، کاهش هزینه تولید از طریق صرفه‌جویی در مصرف مواد و زمان ماشینکاری به‌میزان بیش از ۲۰٪؛
- افزایش بهره‌وری به‌میزان ۷۰٪ در مقایسه با ٤۰٪ در فرایند ماشینکاری؛
- کاهش زمان تولید از ۲۰ دقیقه در ماشینکاری به ۲۰ ثانیه در فورج؛
- افزایش استحکام خمشی به‌میزان ۲۰ درصد و چقرمگی ضربه به‌میزان ۱۵ درصد؛
- کاهش لقی چرخدنده‌های تولیدی با روش فورج دقیق در یک سیکل کاری در مقایسه با چرخدنده‌های ماشینکاری شده به‌میزان ۵۰ درصد (شکل۳)؛

1. Precision Forging
2. Net Shape
3. Near Net Shape



شکل ۳ مقایسه چرخدنده‌های فورج شده به‌صورت دقیق و چرخدنده‌های ماشینکاری شده

- افزایش سختی در گوشت میانی دندانه‌ها در حالت فورج سرد[1]، ۱/۷۵ برابر، در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد، ۱/٦ برابر و در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد ۱/۲ برابر ماده خام اولیه؛
- کاهش تغییر شکلهای ناشی از عملیات حرارتی به‌میزان بیش از ۳۰٪ نسبت به چرخدنده‌های ماشینکاری شده و افزایش دقت؛
- صدای بسیار کمتر حرکت چرخدنده‌های تولید شده با فورج دقیق نسبت به چرخدنده‌های ماشینکاری شده.

ب)معایب

- سرمایه‌گذاری اولیه زیاد؛
- ساخت ابزارها و قالبهای گران‌قیمت؛
- زمان طولانی برای تهیه مقدمات به‌علت پیچیدگی فرایند؛ وابسته به افزایش پارامترهای فرایند نسبت به فورج معمولی.

۵-۲- ملاحظات مربوط به دقت ابعادی

در فورج دقیق چرخدنده، هدف نهایی تولید چرخدنده‌هایی با دندانه‌های کامل و بدون نیاز به هیچگونه عملیات ماشینکاری پس از فرایند فورج است. این کار نیازمند طراحی و ساخت قالبهایی با دقت سازگار است. در فرایند فورج دقیق چرخدنده، باید اختلاف کوچکی بین ابعاد دندانه حفره قالب و دندانه فورج شده وجود داشته باشد. این اختلاف، برای جبران تغییرات زیر نیاز است:

۱- تحت نیروهای فورج، حفره‌های قالب به‌صورت الاستیک منبسط شده و بنابراین ابعاد اولیه آن باید کوچکتر ساخته شود.

۲- چنانچه قطعه‌کار در دمای بسیار بالا باشد، قالبها پیش‌گرم شده و بنابراین منبسط می‌شوند و حفره قالب باید کوچکتر ساخته شود.

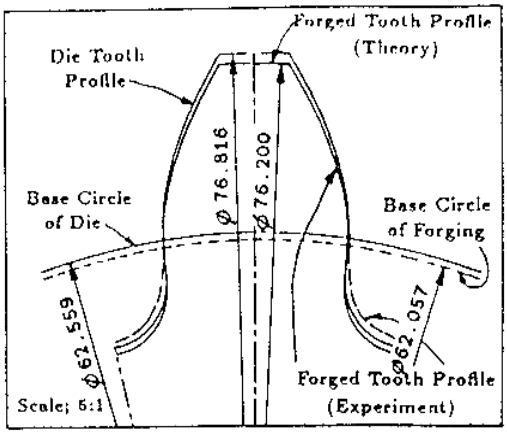
۳- انقباض قطعه‌کار پس از فرایند فورج، در دماهای بالا اتفاق می‌افتد و بنابراین حفره قالب باید بزرگتر ساخته شود.

٤- در فرایند فورج دقیق چرخدنده، معمولاً قالبها از طریق فرایند ماشینکاری اسپارک ساخته می‌شوند. به‌دلیل گشادی حفرهٔ اسپارک شده، الکترود باید کوچکتر ساخته شود.

بنابراین برای دستیابی به چرخدنده‌های فورج شده دقیق، بزرگی هر یک از عوامل بالا باید محاسبه و در نظر گرفته شوند. با استفاده از مقادیر تغییر ابعادی که قبلاً برای استوانه‌های صلب استنتاج شده، عوامل بالا که بر ابعاد نهایی فورج تأثیرگذار هستند، می‌توانند برای تعیین ارتباط بین شعاع قالب و قطعه فورج شده به‌کار روند.

با فرض اینکه، هر نقطه‌ای بر روی شعاع قطعه فورج، تنها در امتداد همان شعاع حرکت می‌کند، دیده شده است که پروفیل دندانه فورج شده در حفره دندانه‌دار قالب، به‌صورت اینولوت باقی می‌ماند. شکل ٤، اثر تجربی به‌دست آمده از دندانه فورج شده در دمای 1000^{0C} را با پروفیل‌های تئوری قالب نظیر و قطعه فورج‌شده نهایی مقایسه می‌کند [۱].

1. Cold Forging

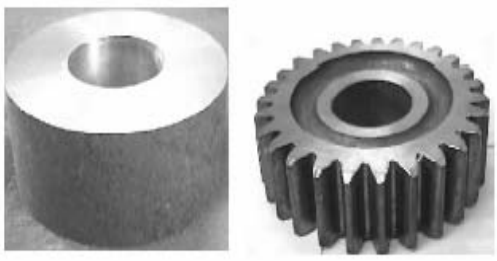


شکل ٤ موقعیت پروفیل‌های تجربی به‌دست آمده از دندانه فورج شده نسبت به پروفیل‌های تئوری مربوط به قالب و قطعه فورج شده نهایی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

این شکل نشان می‌دهد که پروفیل پس از فرایند فورج، از دندانه فورج شده در داخل حفرهٔ دندانه‌دار قالب به شکل اینولوت، به‌صورت اینولوت باقی می‌ماند.

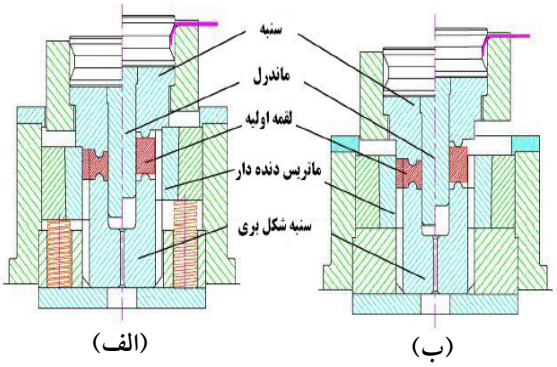
۵-۳- طراحی‌های قالب برای فورج چرخدنده [۲، ۳]

پیش‌فرم معمول مورد استفاده برای فورج چرخدنده، بیلت استوانه‌ای حلقوی بوده که قطر خارجی آن نزدیک به قطر ریشه چرخدنده است. نمونه بیلت و چرخدنده فورج شده در شکل ۵، نشان داده شده است.



شکل ۵ بیلت و چرخدنده فورج شده از آن

برای طراحی قالب این نوع قطعه، چندین روش وجود دارد. در دو نوع مهم از طراحی مجموعه ابزار، قالب به‌صورت صلب به میز ماشین پرس ثابت شده یا از طریق یک فنر نرم به میز فوق متصل است به‌طوری‌که قالب می‌تواند همراه با رم و سنبه حرکت کند. در هر دو حالت، سنبه با حرکت رم دستگاه به سمت پایین حرکت می‌کند در حالی‌که سنبه زیرین در طی فرایند فورج به میز ماشین پرس، ثابت می‌ماند. طرحواره از دو نوع طرح فوق در شکل ٦ نشان داده شده که در این شکل، قالب به‌صورت ارتجاعی (الف) یا به‌صورت صلب (ب) متصل شده است.



شکل ٦ شماتیکی از طراحی‌های ابزار فورج چرخدنده با یک سنبه و سنبه زیرین تخت

اختلاف اصلی این دو طرح در تأثیر نیروهای اصطکاکی به‌وجود آمده در سطح مشترک بین قطعه‌کار و قطعه در هنگامی است که ماده، حفرهٔ دندانه‌دار شدهٔ قالب را پر می‌کند. در حالتی‌که قالب، ثابت است، سنبه در طی فرایند فورج به داخل حفرهٔ قالب حرکت کرده و فرم‌های دندانه باید بر روی سنبه نیز ایجاد شود؛ در حالی‌که در وضعیت قالب متحرک، سنبه به داخل حفرهٔ قالب وارد نمی‌شود بلکه قالب را به سمت پایین فشرده

کرده و بنابراین به‌هیچگونه شکلی از دندانه نیاز نداشته و از شکل سادهٔ استوانه‌ای می‌توان استفاده کرد. ابعاد فرم دندانه فورج شده، تنها به انبساط ناشی از دماهای بالای بیلت و ابزارها وابسته نبوده بلکه همچنین به انبساط الاستیک مربوط به فشار شعاعی وابسته است که در ارتباط با نیروی فورج لازم برای کامل شدن شکل قطعه فورج شده ایجاد می‌شود. در فرایند فورج چرخدنده، مقطع میانی دندانه‌های چرخدنده، در پیشبرد سطوح بالا و پایین پر می‌شود.

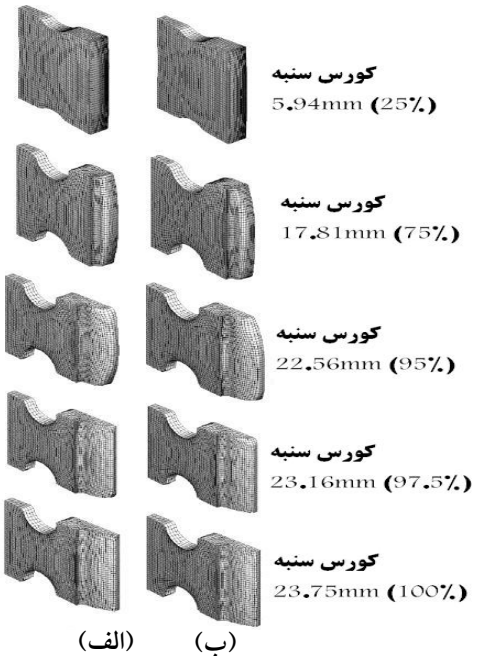
در آخرین مراحل فرایند فورج که گوشه‌های بالا و پایین دندانه پر می‌شوند، به نیروی فورج بالایی نیاز است. زمانی‌که قطعه‌کار با قالب تماس پیدا می‌کند، افزایش قابل‌توجهی در نیرو رخ می‌دهد. بر طبق تحلیلهای انجام شده در [٤]، حرکت نهایی سنبه به اندازهٔ ۰/۳mm، تغییر شکلی به اندازهٔ ۱/۲٪ بیلت را در پی دارد که برای پر کردن گوشه‌ها بوده و با افزایش نیرویی در حدود ۵۰٪ توأم است.

سهولت جریان یافتن مواد به سمت گوشه‌ها، از طریق تکنیکهای طراحی قالب یا طراحی چرخدنده‌هایی که گوشه‌های تیز نداشته باشند، به‌طور شگرفی می‌تواند تجهیزات نیرویی و تنشهای وارد شده به ابزار فورج را کاهش دهد.

مزیت این‌کار، اعوجاج کم، دقت ابعادی بهتر و عمر طولانی‌تر ابزار است.

٥-٤- تشکیل فرم دندانه

مراحل شکل‌گیری دندانه حاصل از شبیه‌سازی تحلیل المان محدود و برای دو طرح قالب در نظر گرفته شده، در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ شکل‌گیری دندانه با استفاده از دو طرح قالب (**الف**) قالب صلب (**ب**) قالب متحرک

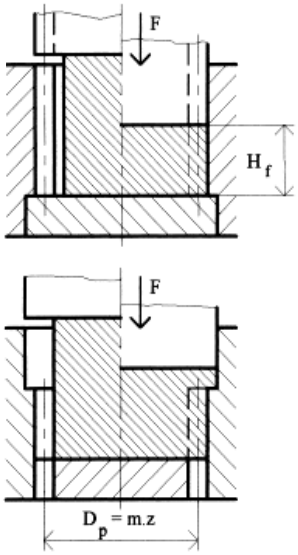
در مراحل ابتدایی فرایند فورج چرخدنده، شیوه جریان فلزی، تقریباً به حالت کله‌زنی با قالب باز شبیه است. بنابراین مادهٔ موجود در مقطع میانی، سریعتر از مادهٔ موجود در نواحی بالا و پایین جریان می‌یابد که دلیل آن نیروی اصطکاک موجود در روی سنبه و سنبه زیرین است. با ادامه یافتن فرایند فورج، دندانهٔ نسبتاً شکل گرفته، در تماس با سطح قالب دندانه‌دار شده است که این قالب یا به‌صورت صلب به میز ماشین ثابت شده یا بر اثر اتصال ارتجاعی به میز، همراه با سنبه حرکت می‌کند.

مقاومت اصطکاکی ناشی از سطح قالب دندانه‌دار شده، با توجه به حرکت قالب، به‌صورت متفاوتی رفتار می‌کند. وقتی که قالب ثابت باشد، نیروی اصطکاکی با جریان فلز به‌سمت پایین مخالفت کرده و ناحیهٔ بالایی سریعتر پر می‌شود. بخش بالاتر دندانه، قبل از نواحی میانی و پایینی دندانه شکل می‌گیرد.

زمانی‌که قالب به‌صورت ارتجاعی بـه میـز ماشـین متـصل باشد، در طی فرایند فورج همراه با سنبه به‌سمت پایین حرکت می‌کند. نیروی اصطکاک به جریان فلز به‌سـمت پـایین کمـک کرده و مواد در بخشهای پایینی نسبت به نواحی بـالا و میـانی قطعه‌کار، سریعتر جریان می‌یابنـد. بنـابراین در طـی پـر شـدن حفره قالب، شکل‌گیری دندانه از پایین به بالا خواهد بود.

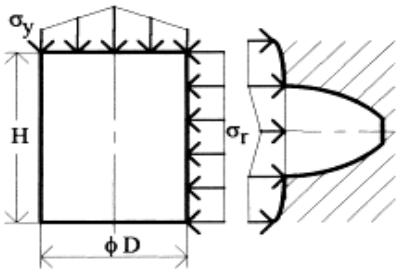
۵-۵- ارزیابی نیروی مورد نیاز برای فـورج دقیـق چرخدنده ساده

بعضی از مهمترین نتایج مربوط به محاسـبه تـنش و تخمـین فـشار متوسـط بـرای فـورج قالـب بـسته داغ مربـوط بـه چرخدنده‌های سادهٔ استوانه‌ای، در اینجا بیان می‌شود. شکل ۸ نمای ساده‌ای از فورج به‌حالت نزدیک بـه شـکل نهـایی، بـا وجود فلش و بدون وجود فلش نشان می‌دهد [۵، ٦، ۷].



شکل ۸ فورج قالب بسته چرخدنـده سـاده اسـتوانه‌ای (الـف) بدون پلیسه (ب) با پلیسه

ساده‌ترین توزیع تنشهای شعاعی و محوری نـشان داده شده در شکل ۹، به‌منظور دستیابی به یک راه حل تحلیلـی برای تخمین فشار متوسط، پذیرفته شده است.



شکل ۹ توزیع تنش نرمال برای مرحله دوم تغییر شکل

با فـرض اینکـه تـنش شـعاعی وابـسته بـه Y نیـست، به‌راحتی می‌توان رابطهٔ زیر را بیان کرد:

$$\frac{4F}{(\pi D^2)} = P = \sigma_p\left[1+(\frac{\mu}{3})/\left(\frac{D}{H}\right)\right]+\sigma_r \qquad (1)$$

مقدار متوسط تنشهای شـعاعی لازم بـرای جـایگزینی در معادلهٔ (۱)، می‌تواند بر اساس هندسهٔ دندانه تخمین زده شود.

با استفاده از روش قاچی، تقریبـی بـرای نهـایی شـدن پرشـدگی دندانـه بـرای تعـداد دندانـه‌هـای $12<z<50$، به‌صورت زیر می‌تواند نوشته شود [۸]:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_p} = 1/4 + 4/3\mu \qquad (2)$$

با استفاده از تحلیل زمینه خطوط لغزشی، رابطهٔ مـشابه اما پیچیده‌تری از این تقریب برای تعداد دندانه‌هـای کمتـر از ۲۰ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_p} = 0/8 + 2/6\mu + 2/8\,\mathrm{Ln}(\frac{D_p}{H}) \qquad (2\text{-الف})$$

جدول ۱ معادلات ساده شده از فشار متوسط

Slab method
$p = \sigma_p\left[2/4 + \mu\left(4/3 + \frac{D}{3H}\right)\right]$
Slip – line field analysis
$p = \sigma_p\left[1/8 + \mu\left(2/6 + \frac{D_p}{3H}\right) + 2/8\ln\left(\frac{D_p}{H}\right)\right]$

۵-٦- تعیین تعداد مراحل پیش‌فرم فورج چرخدنده

هدف از این بخش، مشخص کردن تعداد مراحل پیش‌فرم مورد نیاز برای تولید چرخدنده ساده با ابعاد نهایی است. از روی تعداد مراحل و نیز قطعه ساخته شده در هر مرحله، نقشه‌های اجرایی برای ساخت الکترودهای اسپارک ارائه می‌شود.

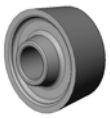
برای شروع طراحی لازم است ابتدا قطعه فورج نهایی با در نظر گرفتن اصول فورج در محیط نرم‌افزار CAD، به‌صورت دقیق ایجاد شود. با توجه به اینکه در این پروژه، هدف تولید شکل نهایی دندانه‌های چرخدنده است، لذا هیچ‌گونه اضافه گوشت ماشینکاری یا هر نوع تغییر دیگری در دندانه‌ها اعمال نمی‌شود.

از آنجاکه در دو سطح پیشانی قطعه، هیچ‌گونه اهمیتی از نظر نوع فرایند انجام شده بر روی آنها وجود ندارد، تنها بر روی این دو سطح به‌میزان ۱mm اضافه گوشت ماشینکاری در نظر می‌گیریم. این کار باعث می‌شود که چنانچه پس از فرایند فورج، در گوشه‌های بالا و پایین دندانه، پرشدگی به‌صورت ناقص انجام شده باشد، با یک مرحله ماشینکاری، این عیب را بتوان برطرف کرد.

علاوه بر این در سطوح خارجی مربوط به دو بخش فلنجی شکل قطعه‌کار، شیب ۱۰ درجه وجود دارد که از این شیب طبیعی قطعه، در قالب آن استفاده می‌شود.

بخشهای مربوط به فیلت‌های قطعه‌کار نیز به همان صورت استفاده می‌شود تا حداقل نیاز به عملیات ماشینکاری را جوابگو باشد. در سطح بالایی قطعه‌کار، بخشی جزیی با ضخامت ۱mm در نظر گرفته می‌شود که برای اطمینان از پرشدن گوشه بالایی قطعه‌کار است.

فرایند شکل‌دهی فلزها، به‌ویژه فرایندهای از نوع[1]، طوری هستند که در یک مرحله نمی‌توانند شکل‌دهی را ایجاد کنند و برای تعیین تعداد مراحل مورد نیاز، روابط کاملاً تعیین کننده‌ای وجود ندارد و فقط باید با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی ماده و نیز با توجه به نحوه جریان مواد که تنها از طریق شبیه‌سازیهای کامپیوتری قابل تعیین است، مراحل فوق و شکل هندسی لازم را برای آنها مشخص ساخت. شکل ۱۰ پیش‌فرم‌های در نظر گرفته شده را برای فورج دقیق چرخدنده هرزگرد مورد نظر نشان می‌دهد.



(الف) مدل پیش‌فرم مرحله اول فورج چرخدنده

(ب) مدل پیش‌فرم مرحله دوم فورج چرخدنده

(ج) مدل مرحله آخر فورج چرخدنده

شکل ۱۰ پیش‌فرم‌های در نظر گرفته شده برای فورج چرخدنده هرزگرد

مراحل طوری در نظر گرفته شده، که قطعه ایجاد شده از هر مرحله بتواند به‌راحتی در مرحله بعدی موقعیت یابد.

1. Bulk Forming

۵-۷- تجهیزات و مواد مصرفی برای فورج دقیق چرخدنده ساده پژو ۴۰۵

۵-۷-۱- جنس قطعه‌کار

با توجه به کارکرد قطعه و نیز مطالعه استانداردهای مربوط، قطعه‌کار از جنس (۱/۰۴۰۱_W) انتخاب شد، که درصد عناصر آلیاژی آن به‌صورت زیر است.

شماره ماده	علامت DIN	C %	Si %	Mn %	P %	S %	% عناصر دیگر
۱/۰۴۰۱_W	C۱۵	۰/۱۲ ۰/۱۸	<=۰/٤	۰/۳ ۰/٦	۰/۰٤۵	۰/۰٤۵	–

۵-۷-۲- جنس قالب

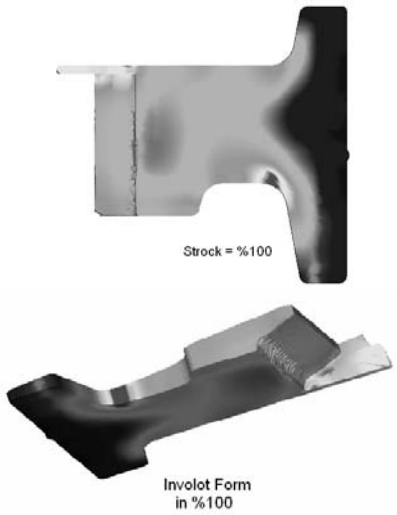
قالب مورد استفاده برای فورج این قطعه، فولاد گرم کار است که شامل ۵٪ کروم بوده و نیتریده شده است. در مراجع، فولادهای H۱۳، H۱۲، H۱۱، برای قالبهای فورج پیشنهاد شده است. فولادی که در این پروژه استفاده و تحلیل بر اساس آن انجام شده، فولادH۱۳ است.

۵-۷-۳- انتخاب دمای مناسب فورج

با توجه به تحقیقات آقای محمدحسین صادقی و نیز جداول موجود در استانداردها، دمای مناسب فورج گرم برای فولادهای آلیاژی و کربنی که در ساخت چرخدنده به‌کار می‌رود، در حالت فورج دقیق در حدود ۸۵۰ – ۷۱۵ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شده است. بر اساس اطلاعات گرفته شده، بعد در تحلیل از نرم‌افزار و با توجه به اینکه بر اثر تغییر شکل پلاستیکی در قطعه‌کار، افزایش دما رخ می‌دهد و نیز کاهش درجه حرارت ناشی از همرفت و تماس قطعه‌کار با قالبها و دمای شروع اکسایش فولاد، دمای مناسب برای بیلت اولیه برابر ۸۲۰ $^{\circ}$C در نظر گرفته شده است.

٦-۱- شبیه‌سازی و تحلیل فرایند فورج دقیق چرخدنده هرزگرد

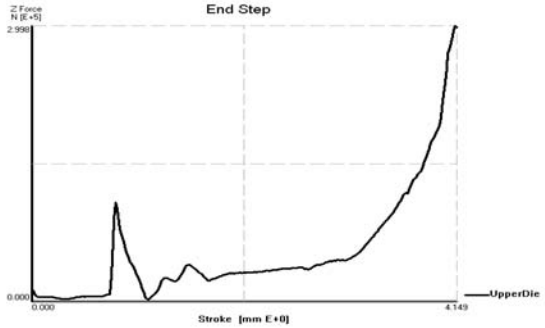
به‌منظور شبیه‌سازی و تحلیل فرایند فورج، از نرم‌افزار Super Forge استفاده شده است. کارهای طراحی مربوط به هندسه قالبها در مراحل مختلف، در نرم‌افزار Solid works انجام شده و سپس در محیط Assembly این نرم‌افزار، قالبها و اجزای هر مرحله از فرایند فورج، به‌طور مناسب موقعیت‌دهی شده است. بعد از آن، فایلهای مربوط با فرمت Stl که قابل خواندن توسط نرم‌افزار Super Forge است، ذخیره شده. از آنجاکه چرخدنده فوق ۳۱ دندانه نسبتاً ریز دارد، برای تحلیل فرایند با نرم‌افزار تحلیلی مربوط، فقط نیمی از دندانه برای تحلیل در نظر گرفته می‌شود، زیرا بخشهای دیگری از چرخدنده به‌صورت متقارن نسبت به این جزء قرار داشته و این سبب خواهد شد که زمان تحلیل فرایند، بسیار کمتر شده و سریعتر بتوان اشکالات طراحی را پس از تحلیل و مشاهده نتایج آن برطرف ساخت. شکل ۱۱ دندانه شکل‌گرفته در انتهای کورس از مرحله آخر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ دندانه شکل گرفته از تحلیل فرایند در مرحله آخر

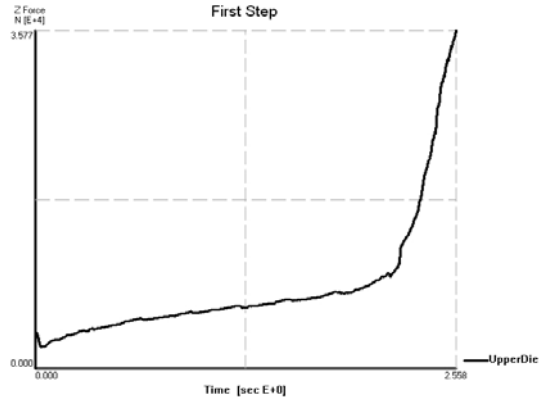
بعد از تحلیل در هر مرحله از فرایند، می‌توان اطلاعات و عوامل مختلفی مانند توزیع دما، نرخ کرنش، تنش مؤثر و غیره را در زمانهای مختلفی از هر مرحله به‌دست آورد.

همچنین با ترسیم منحنی مربوط به نتایج فرایند، تناژ مورد نیاز برای شکل‌گیری هر مرحله از فرایند را می‌توان استخراج کرد. منحنی شکل ۱۲ که از نتایج تحلیل نرم‌افزار گرفته شده، بیانگر تناژ مورد نیاز پرس به‌کار رفته در مرحله آخر فرایند است. تغییرات به‌وجود آمده در شکل۱۲، ناشی از مشکلات ترسیمی نرم‌افزار بوده و همچنین ناشی از بخشهای به شکل پلیسه ناشی از مراحل قبلی است.



شکل ۱۲ منحنی نیرو – کورس در مرحله آخر فرایند

همانطور که شکل ۱۳ نشان می‌دهد، این تغییرات در منحنی نیرو – کورس مرحله اول دیده نمی‌شود.



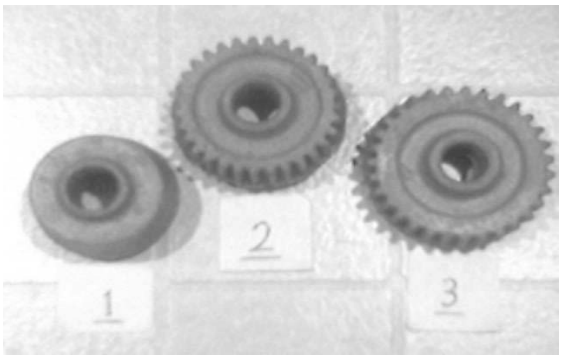
شکل ۱۳ منحنی نیرو – کورس در مرحله اول فرایند

٦-۲- محاسبه حداکثر نیروی لازم و نحوه جریان یافتن مواد در قالب طراحی شده

محاسبه دقیق نیرو در فرایند فورج دقیق که نوعی آهنگری قالب بسته است ممکن نیست؛ زیرا کمیتهای متعددی مانند دمای تغییر شکل، فرایندهای بین کریستالی در مواد، سرعت تغییر شکل، شکل قطعه‌کار، جنس قطعه‌کار و نوع پرس به‌کار رفته در فرایند، به‌طور همزمان بر فرایند شکل دادن تأثیر می‌گذارند.

بر طبق نتایج به‌دست آمده از کارهای تجربی، به‌ویژه در زمینه فورج قالب بسته چرخدنده که در بخشهای قبلی به آنها اشاره شد، نیروی لازم برای فرایند فورج دقیق چرخدنده هرزگرد ساده موردنظر قابل محاسبه است. با مقایسه نتایج تحلیلی مربوط به تناژ مورد نیاز پرس در آخر کورس در هر مرحله، با نتایج تجربی به‌دست آمده در بخش (۵-۵)، می‌توان درصد اختلاف یا دقت تحلیل نرم‌افزار را به‌دست آورد.

میزان این خطا برای مرحله دوم برابر ۵/۲٪ و برای مرحله سوم برابر ٤/۱٪ به‌دست آمده است. برای ارزیابی نحوه جریان مواد، از «پلاستیسین» استفاده شده است. شکل ١٤ قطعات شکل گرفته از این ماده را نشان می‌دهد که به‌خوبی معرف نحوه جریان یافتن[1] صحیح و پیش‌بینی شده مواد در قالبهای فوق است.



شکل ١٤ قطعات شکل گرفته از قالبهای سه مرحله‌ای از ماده پلاستیسین

1. Grain Flow

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پارامترها و متغیرهای مختلف فرایند طراحی پارامتری چرخدنده‌های ساده برای مدلسازی و نیز ساخت قالبهای آنها با استفاده از CAD/CAM شرح داده شد.

تغییرات در حین فرایند تولید و تنوع چرخدنده‌های ساده، دو عامل مهمی است که مهندسان طراح و سازنده با آنها روبه‌رو هستند.

در این مقاله پیش‌فرم‌های مورد نیاز برای فرایند فورج دقیق چرخدنده هرزگرد ساده پژو ۴۰۵، با توجه به رعایت اصول فرایند فوق، طراحی، تحلیل و ساخته شده است.

همچنین روشی ارائه شده که با استفاده از آن، طراحی قطعات هم‌خانواده از چرخدنده‌های ساده در کمترین زمان ممکن و در هنگام طراحی یا ساخت، میسر باشد. نتایج حاصل از تحلیل فرایند، از جمله تناژ مورد نیاز پرس و نحوه جریان مواد، با نتایج تجربی موجود تطابق خوبی را نشان داده است. تدوین فرایند طراحی و ساخت این چرخدنده‌ها در داخل کشور، علاوه بر صرفه‌جوییهای ارزی، گام بزرگی در جهت دستیابی به فناوری ساخت قطعات مشابه محسوب می‌شود.

۸- منابع

[1] Sadeghi, M. H.; Dean, T. A. “Analysis of Tooth profile Accuracy in Precision Forged Spur Gears with Involute Teeth”; Proc, Conf. of SME/NAMRC; Vol. 21; 1993.

[2] cai, J; “precision forging and post processing of spur gears”; Ph. D. Thesis; The university of Birmingham, UK; 2001.

[3] Tuncer, C.; Dean, T. A; “Design alternatives for precision forging hallow parts”; Int. J.Mach Tools; 27(1); 1987; pp. 65-76.

[4] Hu, Z. M; Dean, T. A; “Some aspects of net-shape forging of gears”; proceedings of the second international seminar on precision forging; osako, Japan; 2000.

[5] Bryukhanov, A; Rebelsky, A;“Closed Die forging and Die Design”;GNTIML, Moscow; 1962.

[6] Gagov, V.; “Modern Technology and Industrial Reengineering”;Varna; 1992; p. 63.

[7] Tomov, B; Gogov, V; Kolev, D; “Topical problems of Metal Forming”;Varna; 1989; pp. 104-108.

[8] Tomov, B; Wahnheim, T; “Advanced Manufacturing Technology”; vol. 2; 1993; pp. 147-156.