

تحلیل تجربی و عددی روش آهنگری چرخ دنده مخروطی و مقایسه آن با روش ماشینکاری

سعید بهشتیان مسگران^۱، محمد علی صادقی^۲ و داریوش جواب ور^۳
Saeedbeheshtian@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق هدف بررسی و تحلیل فرآیند آهنگری چرخ دنده مخروطی به روش اجزای محدود به کمک نرم افزار (Super Forge) و مقایسه آن با نتایج تجربی می باشد، در همین راستا نیز مقایسه‌ای بین ریز ساختار چرخ دنده های ماشینکاری شده و چرخ دنده هایی که از طریق آهنگری حاصل شده‌اند بعد و قبل از فرآیند عملیات حرارتی روی آنها انجام شد. بعد از انجام آزمایشات متالوگرافی در سطح چرخ دنده آهنگری شده مارتنزیت های ریزتر با فواصل کم دیده شد ولی در سطح چرخ دنده ماشینکاری شده مارتنزیت های درشتتر و با فواصل بیشتر مشاهده شد. نتایج حاصله بیانگر این است که روش تولید قطعات قبل از انجام عملیات حرارتی تأثیر بسزایی روی ریز ساختار خواهد داشت. همچنین افزایش قطر بیلت که منجر به کاهش ارتفاع بیلت می شود، باعث افزایش نیروی پرس خواهد شد. نتایج بدست آمده از عملیات شبیه سازی در انتهای مقاله نشان داده شده است.

کلیدواژه:

آهنگری- اجزای محدود - نیروی پرس - عملیات حرارتی

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول
۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول
۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه هوایی شهید ستاری

۱- مقدمه

همکاران [۴] بر روی اعوجاج توسط عملیات حرارتی بر روی دو دنده مخروطی آهنگری شده و ماشینکاری شده تحقیقاتی را به عمل آوردند نتایج حاکی از آن است که بعد از عمل آب دهی (Quenching) اعوجاج در دنده‌های آهنگری بیشتر است. براملی و همکاران [۵] بر روی ابزارها، کاربردها و مزایای شبیه سازی در این زمینه تحقیقاتی را به عمل آورده و مقایسه‌ای بین نرم افزارهای شبیه سازی اولیه و امروزی به عمل آوردند. تحقیقات زیادی نیز به روش اجزای محدود بر روی فرآیند آهنگری انجام شده است. بریانی و همکاران [۶] از جمله کسانی بودند که با تلفیق تکنیک‌های شبیه سازی فیزیکی و عددی جهت طراحی فرآیندهای آهنگری گرم در تیغه‌های توربین فولادی ضد زنگ پرداختند و توجه ویژه‌ای به ریز ساختار و مقدار فاز فریت دلتای (δ) به وجود آمده در قطعه در دماهای مختلف و همچنین نرخ کرنش‌های مختلف در طی فرآیند آهنگری داشتند. چنگ و همکاران [۷] نیز به شبیه سازی سه بعدی آهنگری چند مرحله‌ای تیغه کمپرسور توربین گازی و همچنین جریان تنش و کرنش در درجه حرارت‌های مختلف و میزان نیروی لازم برای عملیات آهنگری در طی مراحل مختلف آهنگری این قطعه از جمله کلفت کاری (Up setting)، پیش شکل و آهنگری نهایی پرداختند. چو و همکاران [۸] نیز بر روی بهینه سازی یک قالب باز آهنگری برای گرد و مدور کردن یک قطعه به روش اجزای محدود فعالیت‌های را نیز به عمل آوردند. در این تحقیقات توجه خاصی به سیلان پلاستیک فلز در قالب و همچنین میزان کرنش پلاستیک مؤثر نشده است، ولی در این تحقیق توجه خاصی به موارد ذکر شده صورت گرفته است.

۳- هدف تحقیق

یکی از جنبه‌های مهم آهنگری دنده مخروطی کاهش در هزینه‌ها، زمان تولید و افزایش استحکام، چقرمگی و راندمان تولید می باشد. در همین راستا بررسی سیلان پلاستیک فلز و روشن شدن این مطلب که فلز چگونه و تحت چه مدلی تغییر شکل می یابد و شکل اولیه (بیلت اولیه) را به سمت شکل نهایی پیش می برد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۸ و ۹]. زیرا هم در طراحی قالب و هم در تعیین نیروهای دقیق آهنگری و در نتیجه طراحی خط تولید صحیح اهمیت خواهد داشت. از طرف دیگر با انتخاب صحیح ابعاد بیلت (حجم ثابت)، دانستن مسیر سیلان مناسب و طراحی قالب بر اساس آن، از به وجود آمدن بسیاری از عیوب جلوگیری می شود. در این تحقیق نحوه سیلان پلاستیک مواد در فرآیند آهنگری قطعه چرخ دنده مخروطی با استفاده از روش اجزای محدود به کمک نرم افزار سوپر فورج مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج تجربی

با توجه به مصرف بالای چرخ دنده مخروطی که بیشترین مصرف آن در قسمت دنده هرزگرد دیفرانسیل انواع اتومبیل‌ها در صنایع خودروسازی جهت انتقال نیرو یا گشتاور نیاز به ارائه روش تولیدی با تیراژ بالا و همچنین اقتصادی و با صرفه را به خود می طلبد. این دنده‌ها می بایستی دارای سطحی سخت و مغزی نرم (چقرمه)، تا مقاوم در مقابل سایش و هرگونه تنش و پیچش به هنگام درگیری و انتقال نیرو یا گشتاور باشد. چرخ دنده‌ها همیشه تحت تنش‌های مختلفی قرار دارند و می بایستی در مقابل این تنش‌ها مقاوم باشند. با توجه به تولید این قطعه به روش ماشینکاری الیاف فلز بریده شده و در مقابل این تنش‌ها مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد. اگر این چرخ دنده از طریق آهنگری تولید شود الیاف فلز پیوسته و در مقابل تنش‌های مختلف مقاومت بیشتری نسبت به نمونه ماشینکاری شده از خود نشان می‌دهد [۱]. علاوه بر این امروزه طراحی قالب‌های آهنگری با دید بهبود خواص مکانیکی قطعات آهنگری شده، افزایش عمر قالب، کاهش در هزینه‌ها، صرفه جویی در مواد اولیه مورد نیاز، کاهش میزان ماشینکاری لازم، بهبود رفتار خستگی قطعه آهنگری شده حین کار، انتخاب صحیح نوع پرس، انتخاب صحیح دما و غیره صورت می‌گیرد [۲]. بدیهی است علاوه بر تمهیداتی که در طراحی قالب‌های آهنگری اعمال می‌گردد استفاده از نرم افزارهای شبیه ساز طراحی قالب‌های آهنگری نیز می‌تواند علاوه بر بهبود سازی فرآیند در مواردی پیش بینی لازم برای جلوگیری از آسیب در قطعه آهنگری شده و یا خسارت و حتی شکست در قالب‌های آهنگری را به عمل آورد [۳]. به هر حال تلفیق نرم افزارهای شبیه ساز با بکارگیری پارامترهای مؤثر متناسب با شرایط عملی می‌تواند در رسیدن به یک نتیجه قابل قبول و نزدیک به واقعیت ما را در زمینه صنعت یاری کند [۳]. در عین حال باعث جلوگیری از بسیاری خسارات ناشی از پیش بینی غیر صحیح می‌شود.

۲- سابقه علمی موضوع

تحلیل فرآیند آهنگری توسط روش‌های مختلفی در سال‌های گذشته انجام شده است. سونگ و همکاران [۳] بر روی طراحی قالب بسته آهنگری دنده مخروطی به روش اجزای محدود فعالیت‌های را به عمل آوردند، نتایج حاصله حاکی از این بود که با موقعیت دهی غیر صحیح سنبه و ماتریس در حین فرآیند آهنگری و توزیع نامتعادل نیرو در قالب سبب ایجاد ترک در سنبه و ماتریس خواهد شد و با طراحی صحیح قالب و جریان مواد متعادل و افزایش نیروی سنبه گیر و ماتریس سبب بهبود فرآیند تولید خواهد شد. چو و

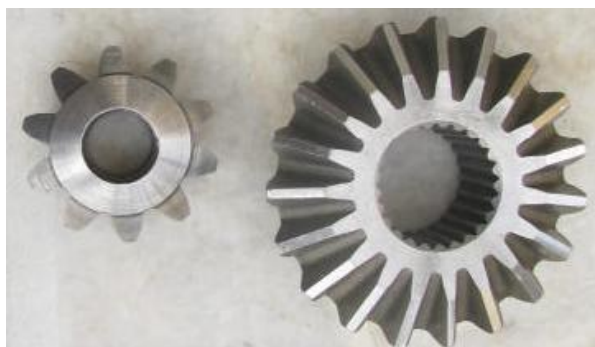


شکل (۲): سنبه و ماتریس ساخته شده در محیط کارگاهی

شکل (۳) و (۴) به ترتیب نمونه‌های از چرخ دنده‌های مخروطی تولید شده به روش آهنگری و ماشینکاری می باشند. در جدول (۱) شماره مواد و نوع استاندارد و ترکیب شیمیایی جنس بیلت خام کاملاً مشخص شده است، البته این مشخصات را می توان به راحتی از کلید فولاد استخراج نمود [۱۰]. فولاد مورد نظر بایستی از گروه فولادهای سماتنه بوده تا قابلیت سخت کاری سطحی را داشته باشند.



شکل (۳): چرخ دنده های تولید شده به روش آهنگری

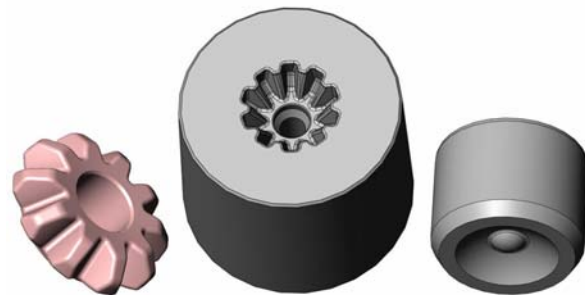


شکل (۴): چرخ دنده های تولید شده به روش ماشینکاری

جهت مقایسه با نتایج تئوری آورده شده است. هدف اصلی از تحقیق، یافتن مسیر سیلان فلز در قطعه مورد نظر، بهینه کردن ابعاد بیلت اولیه و بهبود در کیفیت چرخ دنده با تغییر در هندسه بیلت می باشد. در همین راستا مقایسه‌ای بین ریز ساختار دنده های حاصله از روش های آهنگری و ماشینکاری صورت گرفت.

۴- روش تحقیق

بعد از طراحی قطعه و قالب ها در محیط نرم افزاری Solid Work، الکترودهای مسی جهت فرآیند ماشینکاری اسپارک تولید شد. بعد از اتمام فرآیند ماشینکاری، قالب ها توسط خمیر پولیش (Dipo Past)، پولیش کاری شدند. سپس فرآیند عملیات حرارتی روی آنها صورت گرفت و نهایتاً قالب ها بر روی پرس قرار گرفتند. شکل (۱) و (۲) به ترتیب نمونه‌های طراحی شده قالب ها در محیط نرم افزاری Solid Work و نمونه قالب های ساخته شده در محیط کارگاه را نشان می دهند.



شکل (۱): مدل طراحی شده قطعه و قالب به کمک نرم افزار Solid Work



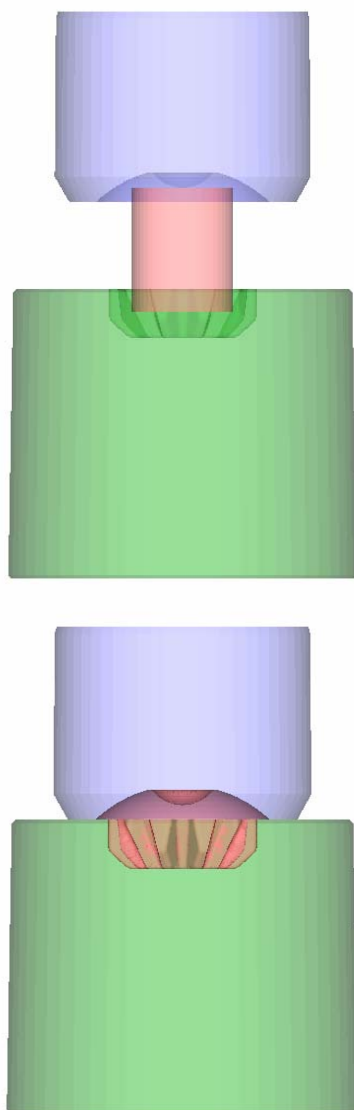
جدول (۱): ترکیب شیمیایی جنس قطعه

| شماره فولاد | Cr % | S % | P % | Mn % | Si % | C % | نام استاندارد |
|-------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-----------|---------------|
| ۱/۷۱۳۱ | ۰/۸۰-۱/۱۰ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۳۵ | ۱/۰۰-۱/۳۰ | ≤۰/۴۰ | ۰/۱۴-۰/۱۹ | 16MnCr5 |

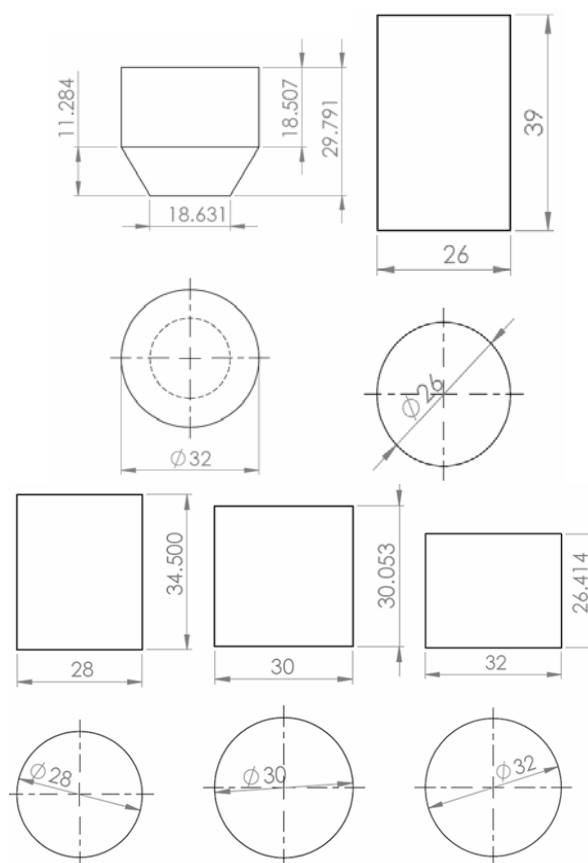
۱-۴- طراحی آزمایش ها

۱-۱-۴- روش اول

بعد از انجام آزمایشات شبیه سازی با ابعاد بیلت های مختلف نهایتاً ابعاد بیلت بهینه که به طور کامل تمام حفره قالب را پر کند با حجم $V=21243.43 \text{ mm}^3$ حاصل شد. آزمایشات بر روی بیلت های مختلف با ابعاد متفاوت صورت گرفت، ابعاد بیلت ها بر حسب میلیمتر از دو نمای مختلف (نمای روبرو و نمای بالا) در شکل (۵) به طور کامل نشان داده شده است. ابتدا شبیه سازی بر روی بیلت ها با قطر ۲۸-۳۰-۳۲ میلیمتر (حجم ثابت) صورت گرفت.



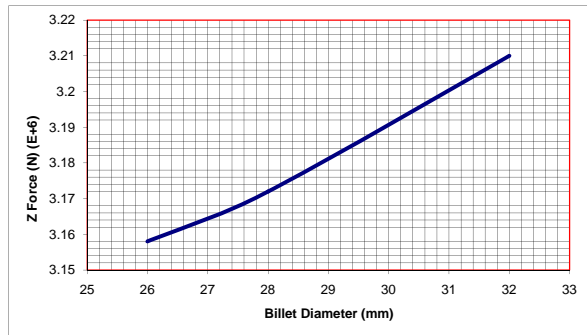
شکل (۶): شماتیکی از موقعیت دهی قالب ها و قطعه



شکل (۵): شماتیکی از ابعاد بیلت های مورد آزمایش

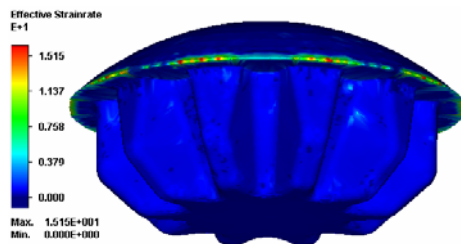
در اشکال (۷) و (۸) نحوه شکل گیری بیلت خام قبل و بعد از عملیات آهنگری نشان داده شده است. نوع المان ها در این شبیه سازی از نوع المان حجمی چهار وجهی (هرمی شکل) می باشد.

در شکل (۶) شماتیکی از موقعیت دهی بیلت نسبت به قالب ها قبل و بعد از عملیات آهنگری در محیط نرم افزار سوپر فورج نشان داده شده است.

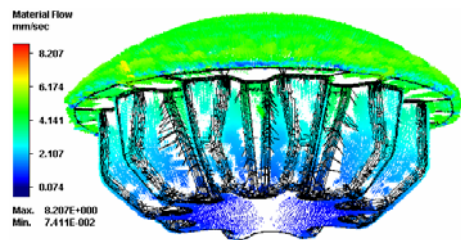


شکل (۹): نمودار قطر بیلت- نیروی پرس

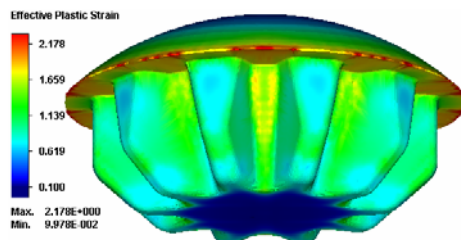
نتایج حاصله از شبیه سازی بیلت با قطر ۳۲ میلیمتر در محیط نرم افزار را می توان در اشکال (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) مشاهده نمود. صحت اعداد جدول (۲) که مربوط به نتایج بدست آمده از شبیه سازی بیلت با قطر ۳۲ میلیمتر را می توان به وضوح در کانتورهای زیر مشاهده نمود.



شکل (۱۰): نرخ کرنش



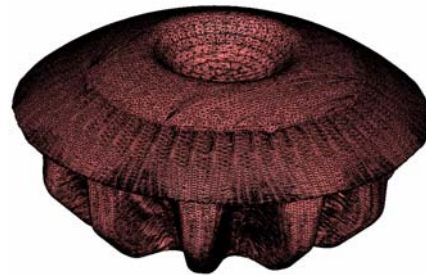
شکل (۱۱): جریان مواد



شکل (۱۲): کرنش پلاستیک مؤثر



شکل (۷): شماتیکی از بیلت خام قبل از عملیات آهنگری



شکل (۸): شماتیکی از بیلت خام بعد از عملیات آهنگری

نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول شماره (۲) کاملاً مشخص شده است. آزمایشات با پرس هیدرولیک با سرعت ثابت (۵ میلیمتر بر ثانیه) انجام شد.

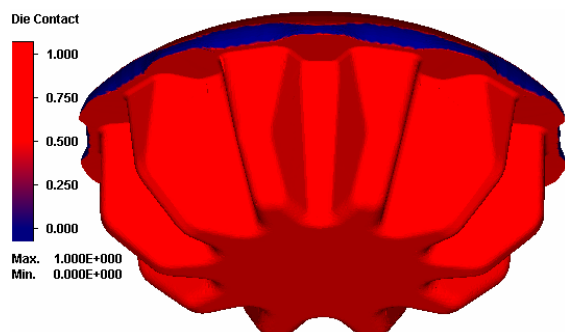
جدول (۲): نتایج آزمایشات

| قطر بیلت (mm) | نیروی پرس (N) | کرنش پلاستیک مؤثر (mm / mm) | نرخ کرنش (mm / s) | جریان مواد (mm / sec) | زمان انجام فرآیند (sec) |
|---------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| ۲۸ | $3/178 \times 10^6$ | ۲/۰۹۱ | ۴۹/۹۵ | ۱۳/۱۶ | ۵ |
| ۳۰ | $3/188 \times 10^6$ | ۲/۰۲۶ | ۱۴/۲۵ | ۱۲/۴۰ | ۴/۶ |
| ۳۲ | $3/210 \times 10^6$ | ۲/۱۷۸ | ۱۵/۱۵ | ۸/۲۰۷ | ۳/۹۹۲ |

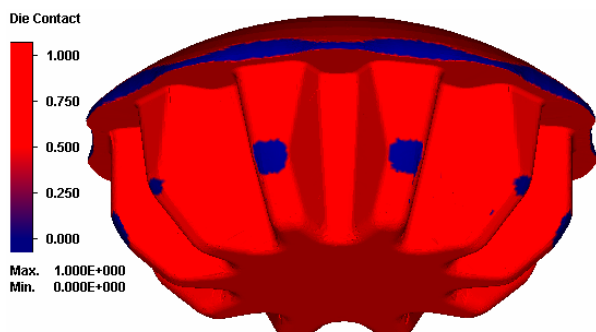
نتایج حاصله از شبیه سازی حاکی از این است که افزایش قطر بیلت باعث افزایش نیروی پرس خواهد گردید، این نتیجه به صورت نمودار در شکل (۹) نشان داده شده است.

جدول (۳): نتایج آزمایشات

| قطر بیلت (mm) | نیروی پرس (N) | کرنش پلاستیک مؤثر (mm/mm) | نرخ کرنش (mm/s) | جریان مواد (mm/sec) | زمان انجام فرآیند (sec) |
|----------------|---------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| ۲۶ | $1/839 \times 10^6$ | ۲/۳۶۹ | ۲۰/۵۸ | ۲۰/۶۲ | ۵/۳۵۸ |
| ۳۲ (سر مخروطی) | $1/864 \times 10^6$ | ۱/۹۷۰ | ۱۷/۸۵ | ۲۰/۴۳ | ۲/۴۶۴ |

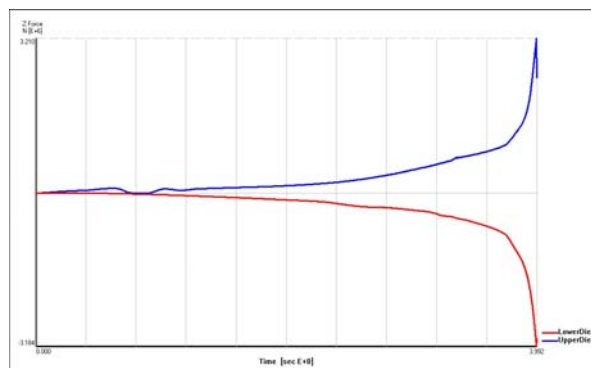


شکل (۱۵): تماس بیلت با قالب مربوط به بیلت با سر مخروطی ناقص

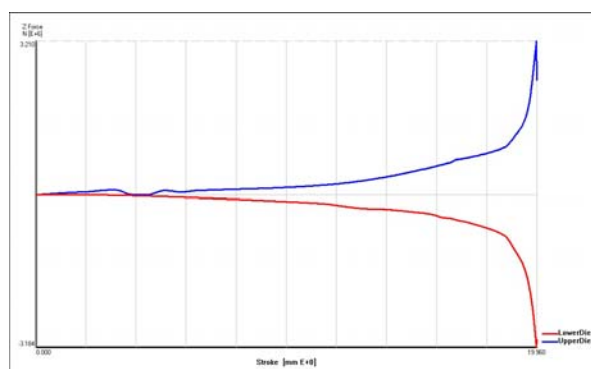


شکل (۱۶): تماس بیلت با قالب مربوط به بیلت با قطر ۲۶ میلیمتر

در انتها مقایسه‌ای بین ریز ساختار قطعه تولید شده به روش آهنگری و همچنین قطعه تولید شده به روش ماشینکاری بعد از اتمام آزمایشات متالوگرافی صورت گرفت [۴]. آزمایشات متالوگرافی در دو نقطه مغز و سطح چرخ دنده ها و در دو حالت قبل و بعد از فرآیند عملیات حرارتی صورت گرفت. در اشکال (۱۷) و (۱۸) شماتیکی از نواحی برش خورده چرخ دنده‌ها که مورد آزمایش متالوگرافی واقع گردید نشان داده شده است. نمونه‌ها بعد از برش خوردن با دستگاه پولیش (شکل ۱۹)، پولیش زده شده و عملیات اچ روی آنها صورت گرفت و در انتها از ریز ساختار نمونه با میکروسکوپ نوری (شکل ۲۰) عکس برداری شد. جزئیات کامل ریزساختارها در اشکال (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۳): نمودار زمان- نیروی پرس مربوط به بیلت با قطر ۳۲ میلیمتر



شکل (۱۴): نمودار پیشروی- نیروی پرس مربوط به بیلت با قطر ۳۲ میلیمتر

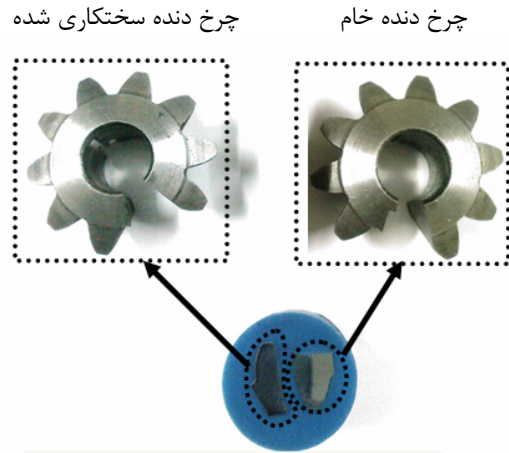
۴-۱-۲- روش دوم

در این روش شبیه سازی بر روی بیلت با قطر ۲۶ میلیمتر و بیلت با سر مخروطی ناقص (حجم ثابت) صورت گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول شماره (۳) کاملاً مشخص شده است. طبق نتایج بدست آمده کمترین نیروی مربوط به بیلت با قطر ۲۶ میلیمتر می باشد، ولی لازم به ذکر است که این بیلت قادر به پر کردن تمام حفره قالب نبوده ولی بیلت با سر مخروطی ناقص با همین حجم قادر به پر کردن تمامی حفره قالب شد. این نتیجه در اشکال (۱۵) و (۱۶) کاملاً نشان داده شده است. طوری که در شکل (۱۵) تمام قسمت های مربوط به دنده های چرخ دنده مخروطی کاملاً قرمز می باشد رنگ قرمز در این شکل نشان از تماس کامل مواد با بدنه حفره قالب می باشد و به نوعی مواد توانایی پر کردن تمام حفره قالب را داشته، در حالی که در شکل (۱۶) گوشه های دنده آبی رنگ می باشد و این نشان دهنده این است که مواد در این قسمت با حفره قالب تماس نداشته و به نوعی توانایی پر کردن تمام حفره قالب را نداشته است.

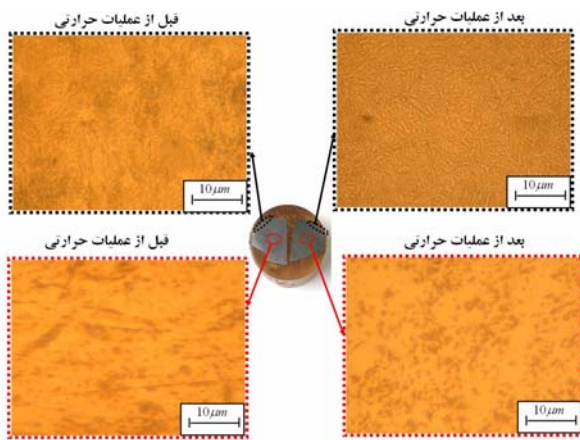
نتیجه حاصله از آزمایش این است که هندسه بیلت تأثیر بسزایی در پر کردن حفره قالب خواهد داشت. در این روش حجم بیلت نسبت به روش اول ۵۳۷/۱۶ میلیمتر مکعب کاهش پیدا کرد.



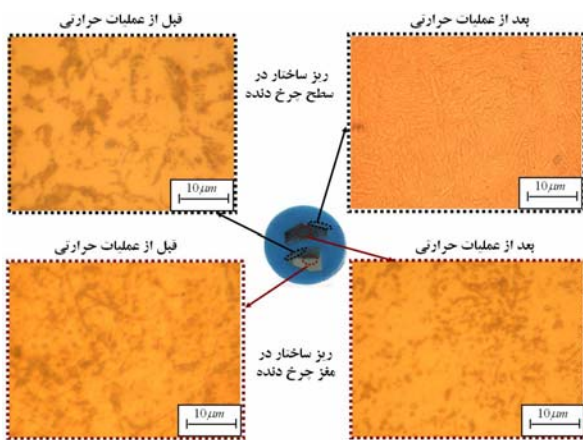
شکل (۲۰): شماتیکی از میکروسکوپ نوری



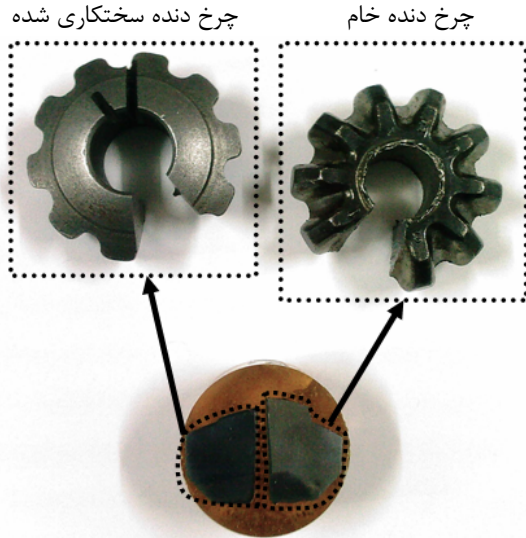
شکل (۱۷): شماتیکی از نواحی برش خورده چرخ دنده های ماشینکاری شده



شکل (۲۱): ریز ساختار قبل و بعد از عملیات حرارتی در نواحی مختلف چرخ دنده تولید شده به روش آهنگری



شکل (۲۲): ریز ساختار قبل و بعد از عملیات حرارتی در نواحی مختلف چرخ دنده تولید شده به روش ماشینکاری



شکل (۱۸): شماتیکی از نواحی برش خورده چرخ دنده های آهنگری شده



شکل (۱۹): شماتیکی از دستگاه پولیش

۵- نتیجه گیری

پس از انجام شبیه‌سازی بر روی فرآیند آهنگری چرخ دنده مخروطی نتایج حاکی از این است که:

۱- با افزایش قطر بیلت که منجر به کاهش ارتفاع بیلت می شود، باعث افزایش نیروی پرس خواهد شد.

۲- با توجه به اینکه حجم بیلت به قطر ۲۶ میلیمتر برابر با حجم بیلت با سر مخروطی ناقص بود ولی توانایی پر کردن تمامی حفره قالب را نداشته و گوشه های دنده در داخل قالب پر نمی شد، ولیکن بیلت با سر مخروطی ناقص به خوبی تمامی حفره قالب را پر می کرد این پدیده حاکی از آن است که هندسه بیلت نقش بسزایی در پر کردن حفره قالب خواهد داشت.

۳- بعد از انجام آزمایشات متالوگرافی بر روی هر دو دنده حاصله از فرآیند آهنگری و ماشینکاری نتایج حاصله حاکی از آن است که نوع فرآیند تولید قطعات قبل از انجام عملیات حرارتی تأثیر بسزایی در تغییر ریز ساختار خواهد داشت طوری که در سطح دنده تولید شده به روش آهنگری مارتنزیت های ریز با فواصل کم مشاهده شد ولی در سطح دنده تولید شده به روش ماشینکاری مارتنزیت های درشت تر و با فواصل بیشتری نسبت به نمونه آهنگری شده مشاهده شد. و با توجه به اینکه در دنده ها سختی سطح بیشتر و چقرمگی در مغز مورد اهمیت است، و این امر تنها در نمونه آهنگری شده قابل مشاهده است، زیرا از خصوصیات مارتنزیت ریزتر سختی بیشتر، مدول برشی، استحکام کششی و UTS بیشتر می باشد و به لحاظ نرمی و چقرمه بودن در مغز فرآیند آهنگری تنها فرآیندی است که بیشترین چقرمگی را به لحاظ بریده نشدن الیاف فلز توسط لبه برنده ابزار از خود نشان می دهد.

۶- مراجع

- [۱] ف. بیگری، م. صادقی، "طراحی قالب های فورج"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تابستان ۱۳۸۶.
- [2] J. H. Johnson and R. T. Kiepur, "Metale Hanbook Ninth Edition Vol. 14 Forming and Forging", ASM International, 1993.
- [3] J. H. Song and Y. T. Im, "Process Design For Closed-Die Forging of Bevel Gear by Finite Element Analyses", Journal of Materials Processing Technology, 1-7, 192-193, 2007.
- [4] J. R. Cho and W. J. Kang, "Distortions Induced by Heat Treatment of Automotive Bevel Gear", Journal of Materials Processing Technology, 476-481, 153-154, 2004.
- [5] A. N. Bramley and D. J. Mynors, " The Use of Forging Simulation Tools" , Materials and Design, 21, pp. 279-286, 2000.
- [6] P. F. Bariani, S. Bruschi, and T. Dal Nergro, "Integrating Physical and Numerical Simulation Techniques to Design the Hot forging Process of Stainless Steel Turbine Blades", International Journal of Machine Tool & Manufacture, 44, pp. 945-951, 2004.
- [7] L. V. Cheng, L. Zhang, M. U. Zhengiun, T. Qingan, and Z. Quying, "3DFEM Simulation of the Multi- Stage Forging Process of a Gas Turbine Compressor Blade", Journal of Materials Processing Technology, 198, pp. 463- 470, 2008.
- [8] S. K. Choi, M. S. Chun, C. J. Van Tyne and Y. H. Moon, "Optimization of Open Die Forging of Round Shapes Using FEM Analysis", Journal of Materials Processing Technology, 172, pp. 88-95, 2006.
- [9] A. Ghaei, M. R. Movahhedy and A. Karimi Taheri, "Finite Element Modelling Simulation of Radial Forging of Ttubes Without mandrel", Materials and Design, 29, pp. 867-872, 2008.
- [۱۰] ا. ساعتچی، ح. ادريس، " کتاب فولاد"، انتشارات ارکان، بهار ۱۳۸۴.