

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک

رشته‌ی مهندسی مکانیک
گرایش ساخت و تولید

عنوان

مطالعه توزیع تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تولید فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو

نگارش

حسین باقی‌زاده

استاد راهنما

دکتر سید هادی قادری

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی مکانیک

گروه: طراحی جامدات

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین باقی‌زاده

تحت عنوان:

مطالعه توزیع تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تولید فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو در تاریخ ۱۳۹۳/۶/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی و با نمره ۱۹/۳۰ مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : سید هادی قادری
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : مجتبی قطعی		نام و نام خانوادگی : مهدی گردویی
			نام و نام خانوادگی : سید وحید حسینی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به

روح پاک پدرم

و

قلب مهربان مادرم

سپاس‌گزاری

اینجانب بر خود واجب می‌دانم که از زحمات فراوان و راهنمایی‌های ارزنده‌ی استاد عزیز و بزرگوارم، جناب آقای دکتر سید هادی قادری صمیمانه تشکر و قدردانی کنم. ایشان در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه و همچنین در طول دوران تحصیل اینجانب در مقطع کارشناسی ارشد، دلسوزانه یاری‌رسان من بودند. بی‌تردید به سرانجام رساندن این پژوهش، بدون حمایت علمی و معنوی ایشان ممکن نبود. امیدوارم که در آینده نیز افتخار شاگردی، همکاری و دوستی با این استاد گرانقدر را داشته باشم.

از همکاری صمیمانه جناب آقای مهندس جواد علی‌نژاد، مدیر محترم واحد تحقیق و توسعه شرکت فنر لول ایران، تشکر و قدردانی می‌کنم.

از استاد ارزشمندم، جناب آقای دکتر مهدی گردویی، که در طول مدت تحصیل در این مقطع، از حضورشان بهره علمی و معنوی بردم، تشکر و قدردانی می‌نمایم و شاگردی ایشان را افتخاری برای خود می‌دانم.

از اساتید محترم دانشکده مهندسی مکانیک، جناب آقای دکتر مجتبی قطعی، دکتر حمید رضا ایپک‌چی، دکتر مهدی بامداد، دکتر محسن نظری و دکتر مهدی قناد، که در آموزش دروس به بنده متحمل زحمت شدند، تشکر و سپاس‌گذاری می‌کنم.

و همچنین از خانواده عزیزم که در تمامی مراحل زندگی، دلسوزانه و عاشقانه، حامی و پشتیبان من بودند بینهایت سپاس‌گذارم.

تعهد نامه

اینجانب حسین باقی‌زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه توزیع تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تولید فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

فنرها یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین قطعات هر ماشین هستند که با توجه به نوع کاربریشان، ممکن است تحت شرایط بارگذاری شدید استاتیکی یا دینامیکی قرار گیرند. بنابراین توجه و دقت در طراحی و بهبود فرایند ساخت آن‌ها از اهمیت شایانی برخوردار است. تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تولید فنر، نقش مهمی در عملکرد آن ایفا می‌کند. آگاهی از این تنش پسماند و چگونگی اثر مراحل فرایند تولید روی آن، یک گام ضروری به سوی رسیدن به یک بهینه‌سازی مناسب در طراحی و فرایند تولید می‌باشد. سه مرحله‌ی اصلی فرایند تولید فنر عبارتند از شکل‌دهی (فرنریچی)، ساچمه‌زنی و پیش‌تنظیم. ابتدا مفتول مستقیم به شکل فنر درآمد؛ سپس طی عملیات ساچمه‌زنی، فنر تولید شده تحت برخورد ساچمه‌های فولادی با سرعت بالا قرار می‌گیرد و پس از آن، فنر یک بار تا ارتفاع صلب فشرده و سپس رها می‌شود. در این پژوهش، شبیه‌سازی سه مرحله‌ی فرایند تولید فنر ماریپیچ فشاری، به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس، به صورت سه‌بعدی و با هدف به دست آوردن و مطالعه‌ی تنش پسماند ایجاد شده، صورت گرفت. فنر مورد مطالعه، فنر ماریپیچ سیستم تعلیق عقب خودروی پراید است که در کارخانه‌ی فنرلول ایران تولید می‌شود. این فنر به صورت سرد شکل‌دهی می‌شود. شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی و ساچمه‌زنی در حل‌گر صریح و فرایند پیش‌تنظیم با حل‌گر استاندارد آباکوس انجام شد. در شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، برای نزدیک بودن به واقعیت، یک برنامه متلب برای ایجاد توزیع ساچمه‌ها به صورت تصادفی نوشته شد. ساچمه‌ها در دو نوع صلب و الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شد. برای ساچمه‌های الاستیک-پلاستیک، برخورد زاویه‌دار و برخورد عمودی با در نظر گرفتن تماس بین خود ساچمه‌ها نیز مطالعه شد. در شبیه‌سازی پیش‌تنظیم، ابتدا تنش پسماند ایجاد شده بر اثر ساچمه‌زنی، به یک حلقه‌ی فنر انتقال داده شد و سپس شبیه‌سازی صورت گرفت. ابعاد فنر به دست آمده از شبیه‌سازی، تطابق خوبی با نمونه‌ی واقعی دارد. توزیع کرنش، تنش در حین شکل‌دهی و تنش پسماند پس از آن مورد مطالعه قرار گرفت. در لحظه‌ی شکل‌دهی، بیشترین تنش در قطر داخلی و خارجی مشاهده شد. اما تنش پسماند پس از فرایند، در مرکز مقطع به بیشترین مقدار خود می‌رسید. نیروی لازم برای شکل‌دهی فنر، اثر ضریب اصطکاک و سرعت تغذیه‌ی مفتول به دست آمد. با افزایش ضریب اصطکاک، بیشینه‌ی کرنش پلاستیک و تنش معادل نیز افزایش یافت؛ اما به طور کلی تاثیر این پارامتر چندان قابل توجه نبود. در شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، با افزایش تعداد برخورد تا حد مشخصی، تنش پسماند افزایش یافته و سپس تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین در سرعت‌های برخورد بالاتر، مقدار بیشینه‌ی تنش و نیز

پهنای پروفیل تنش افزایش یافت. مقایسه‌ای با نتایج تجربی موجود صورت گرفت که بیشترین تطابق مربوط به ساچمه‌های پلاستیک و حالتی که برخورد بین ساچمه‌ها در نظر گرفته شده بود مشاهده شد. کاهش طول به دست آمده از شبیه‌سازی پیش‌تنظیم، با مقدار واقعی اختلاف ناچیزی داشت. توزیع تنش در لحظه‌ی فشرده شدن فنر تا ارتفاع صلب و تنش پسماند پس از فرایند مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در هر مرحله برای صحه‌گذاری بر مطالعه‌ی عددی انجام شده، مقایسه‌ای با نتایج موجود از سایر پژوهشگران صورت گرفت.

واژگان کلیدی: تنش پسماند، فنر مارپیچ، فنرپیچی، ساچمه‌زنی، پیش‌تنظیم، روش المان محدود.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. باقی‌زاده، حسین؛ قادری، سید هادی؛ علی نژاد، جواد؛ ۱۳۹۳. مطالعه عددی توزیع تنش پسماند ایجاد شده در شکل‌دهی سرد فنر مارپیچ سیستم تعلیق خودرو، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، اهواز.
۲. باقی‌زاده، حسین؛ قادری، سید هادی؛ علی نژاد، جواد؛ ۱۳۹۳. مطالعه تنش پسماند ایجاد شده در فنر مارپیچ سیستم تعلیق خودرو بر اثر فرایند ساچمه‌زنی، سومین کنفرانس بین‌المللی مواد مهندسی و متالورژی، تهران.
۳. قادری، سید هادی؛ باقی‌زاده، حسین؛ ۱۳۹۲. تحلیل عددی شکل‌دهی سرد فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو، همایش ملی مهندسی مکانیک، ملایر.

فهرست عنوان‌ها

ب	تقدیم به.....
ه	سپاس‌گزاری.....
و	چکیده.....
ی	فهرست عنوان‌ها.....
ل	فهرست شکل‌ها.....
س	فهرست جدول‌ها.....
ع	فهرست نشانه‌ها.....
ا	فصل ۱ مقدمه.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ تنش پسماند.....
۴	۳-۱ فنر لول.....
۵	۱-۳-۱ ماده فنر.....
۵	۲-۳-۱ عوامل موثر در انتخاب ماده فنر.....
۵	۳-۳-۱ خواص قابل انتظار از مواد مخصوص فنر [۸].....
۶	۴-۳-۱ مواد مرسوم قابل استفاده در فنرها [۸].....
۷	۵-۳-۱ عناصر شیمیایی موجود در فولادها و تاثیر آنها بر روی خواص فنر [۸].....
۹	۴-۱ روشهای فنر پیچی.....
۹	۱-۴-۱ توسط دریل دستی و میله‌های مخصوص.....
۱۰	۲-۴-۱ به کمک ماشین‌تراش معمولی.....
۱۱	۳-۴-۱ به کمک قرقره‌های مخصوص.....
۱۱	۴-۴-۱ به کمک ماشین‌های مخصوص (CNC و NC).....
۱۳	۵-۱ فرایند تولید فنر در شرکت فنر لول ایران.....
۱۳	۱-۵-۱ فنر پیچی.....
۱۳	۲-۵-۱ عملیات حرارتی.....
۱۴	۳-۵-۱ ساچمه‌زنی.....
۲۰	۴-۵-۱ پیش‌تنظیم (اصلاح طول).....

- ۶-۱ مروری بر پژوهش‌های پیشین ۲۱
- ۷-۱ اهداف پایان‌نامه ۲۳
- ۸-۱ ساختار این پایان‌نامه ۲۴

فصل ۲ تحلیل عددی ۲۵

- ۱-۲ مقدمه ۲۶
- ۲-۲ معرفی نرم‌افزار آباکوس ۲۶
- ۳-۲ معرفی نمونه‌ی صنعتی ۲۸
- ۴-۲ شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی فنر ۳۰
- ۵-۲ شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی ۳۴
- ۶-۲ شبیه‌سازی فرایند پیش‌تنظیم (اصلاح طول) ۴۰

فصل ۳ نتایج و بحث ۴۵

- ۱-۳ مقدمه ۴۶
- ۲-۳ شبیه‌سازی شکل‌دهی فنر ۴۶
- ۱-۲-۳ توزیع تنش و کرنش ۴۶
- ۲-۲-۳ نیروی شکل‌دهی ۵۳
- ۳-۲-۳ اثر ضریب اصطکاک ۵۳
- ۴-۲-۳ اثر سرعت تغذیه مفتول ۵۵
- ۵-۲-۳ اثر جابه‌جایی راهنمای متحرک ۵۵
- ۳-۳ شبیه‌سازی ساچمه‌زنی ۵۶
- ۱-۳-۳ ساچمه صلب ۵۶
- ۲-۳-۳ ساچمه تغییر شکل پذیر ۶۳
- ۳-۳-۳ مقایسه با نتایج تجربی ۶۸
- ۴-۳ شبیه‌سازی پیش‌تنظیم ۷۰

فصل ۴ جمع‌بندی و پیشنهادها ۷۴

- ۱-۴ نتیجه‌گیری ۷۵
- ۲-۴ پیشنهادها ۷۶

منبع‌ها ۷۸

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) انواع فنرهای مکانیکی [۷]..... ۴
- شکل (۲-۱) تولید فنر به کمک ماشین تراش [۹]..... ۱۱
- شکل (۳-۱) دستگاه فنر پیچی CNC [۱۱، ۱۲]..... ۱۲
- شکل (۴-۱) فرایند ساچمه‌زنی روی الف) فنر در دو حالت مختلف [۱۶، ۱۷]، ب) چرخ‌دنده و پره [۱۸]،
[۱۹]..... ۱۵
- شکل (۵-۱) ایجاد تنش پسماند فشاری در اثر ساچمه‌زنی [۲۰]..... ۱۶
- شکل (۶-۱) مراحل تست آلمن [۲۴]..... ۱۷
- شکل (۷-۱) منحنی اشباع آلمن [۲۵]..... ۱۸
- شکل (۸-۱) انواع ساچمه از نظر هندسی [۲۷]..... ۱۹
- شکل (۹-۱) نمایی از دستگاه پیش‌تنظیم..... ۲۰
- شکل (۱-۲) فنر مورد مطالعه..... ۲۸
- شکل (۲-۲) نمودار تنش- کرنش حقیقی ماده فنر [۳۵]..... ۲۹
- شکل (۳-۲) دستگاه شکل‌دهی فنر..... ۳۰
- شکل (۴-۲) مدل المان محدود شکل‌دهی فنر..... ۳۱
- شکل (۵-۲) تعداد المانهای مفتول فنر در ۶ اندازه مش متفاوت، (۱) ۹۳۴۰، (۲) ۱۵۰۴۰، (۳) ۴۴۸۶۰، (۴) ۱۰۱۵۰۰، (۵) ۲۳۶۵۲۰، (۶) ۷۱۵۲۰۰..... ۳۲
- شکل (۶-۲) آنالیز مش، نیروی تغذیه مفتول بر حسب تعداد المان..... ۳۲
- شکل (۷-۲) مقایسه انرژی داخلی و جنبشی..... ۳۴
- شکل (۸-۲) قطاع در نظر گرفته شده از فنر برای شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، الف) هندسه و ابعاد، ب) ناحیه برخورد..... ۳۵
- شکل (۹-۲) مدل مش‌بندی شده‌ی قطاع فنر برای ساچمه‌زنی..... ۳۷
- شکل (۱۰-۲) موقعیت تصادفی ساچمه‌ها (یک‌دهم اندازه واقعی) در صفحه x-y..... ۳۸

- شکل (۲-۱۱) مدل المان محدود فرایند ساچمه‌زنی ۳۹
- شکل (۲-۱۲) جهت‌گیری ماده در شبیه‌سازی پیش‌تنظیم ۴۱
- شکل (۲-۱۳) نحوه مش‌بندی مقطع فنر برای پیش‌تنظیم ۴۳
- شکل (۲-۱۴) مدل المان محدود پیش‌تنظیم ۴۴
- شکل (۳-۱) فنر به‌دست آمده از شبیه‌سازی ۴۷
- شکل (۳-۲) توزیع تنش ون میزز ۴۸
- شکل (۳-۳) توزیع کرنش پلاستیک معادل ۴۸
- شکل (۳-۴) کرنش پلاستیک معادل در مقطع فنر ۴۹
- شکل (۳-۵) تنش در مقطع (A در شکل (۳-۲)) فنر در حین شکل‌دهی الف) تنش معادل ون میزز، ب) تنش محوری عمودی ۵۰
- شکل (۳-۶) تنش در طول مقطع در لحظه‌ی شکل‌دهی ۵۰
- شکل (۳-۷) تنش در مقطع (B در شکل (۳-۲)) فنر پس از شکل‌دهی الف) تنش معادل ون میزز، ب) تنش محوری عمودی ۵۱
- شکل (۳-۸) تنش پسماند در طول مقطع پس از شکل‌دهی ۵۲
- شکل (۳-۹) توزیع تنش حین خمش و پس از باربرداری الف) ماده بدون کرنش‌سختی [۴۳]، ب) ماده دارای کرنش‌سختی [۴۴] ۵۲
- شکل (۳-۱۰) نیروی شکل‌دهی در طول فرایند ۵۳
- شکل (۳-۱۱) اثر ضریب اصطکاک بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) تنش معادل ۵۴
- شکل (۳-۱۲) اثر ضریب اصطکاک بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) تنش معادل [۳۵] ۵۴
- شکل (۳-۱۳) اثر سرعت تغذیه مفتول بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) نرخ کرنش ۵۵
- شکل (۳-۱۴) اثر جابه‌جایی راهنمای متحرک روی گام فنر ۵۶
- شکل (۳-۱۵) تغییر شکل سطح پس از تعداد برخوردهای مختلف ۵۷
- شکل (۳-۱۶) توزیع تنش پسماند پس از برخورد تصادفی ۱۵۰ ساچمه با سرعت اولیه $v = 75 \text{ m/s}$ ۵۸

- شکل (۳-۱۷) مولفه‌های تنش پسماند ایجاد شده ۵۸
- شکل (۳-۱۸) تغییرات تنش پسماند با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های صلب ۵۹
- شکل (۳-۱۹) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های صلب ۶۰
- شکل (۳-۲۰) تغییرات تنش پسماند با افزایش سرعت برخورد ساچمه‌های صلب ۶۱
- شکل (۳-۲۱) اثر سرعت برخورد روی تنش پسماند الف) مگوید و همکاران [۳۰]، ب) هنگ و همکاران [۳۳] ۶۲
- شکل (۳-۲۲) اثر سرعت برخورد روی تنش پسماند در آلیاژ آلومینیوم [۴۲] ۶۲
- شکل (۳-۲۳) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش سرعت برخورد ساچمه‌های صلب ۶۳
- شکل (۳-۲۴) تغییرات تنش پسماند با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های تغییر شکل پذیر ۶۴
- شکل (۳-۲۵) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های تغییر شکل پذیر ۶۵
- شکل (۳-۲۶) مقایسه تنش پسماند در سه حالت تحلیل با ساچمه تغییر شکل پذیر ۶۶
- شکل (۳-۲۷) تغییر شکل سطح پس از برخورد ۷۵ ساچمه در حالتی که تماس بین ساچمه‌ها وجود دارد. ۶۷
- شکل (۳-۲۸) مقایسه کرنش پلاستیک معادل در سه حالت تحلیل با ساچمه تغییر شکل پذیر ۶۸
- شکل (۳-۲۹) مقایسه تنش پسماند به دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی ۶۹
- شکل (۳-۳۰) کاهش طول پس از پیش‌تنظیم ۷۰
- شکل (۳-۳۱) تنش محوری در پیش‌تنظیم ۷۱
- شکل (۳-۳۲) تنش پسماند محوری در مقطع فتر پس از پیش‌تنظیم ۷۲
- شکل (۳-۳۳) تنش در پیش‌تنظیم (بدون پیش‌تنش) ۷۳

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲) خواص ماده‌ی استفاده شده برای ساچمه (AISI4340) [۳۸] ۴۰

فهرست نشانه‌ها

d	قطر مفتول فنر	ω_0	اولین فرکانس طبیعی سیستم
OD_C	قطر خارجی فنر پس از شکل‌دهی	n	تعداد ساچمه
OD_P	قطر خارجی فنر پس از پیش‌تنظیم	τ	تنش برشی میانگین
OD_{SC}	قطر خارجی فنر حاصل از شبیه‌سازی	S_L	تنش طولی
d_S	قطر ساچمه	S_T	تنش مماسی
P_C	گام فنر پس از شکل‌دهی	m	جرم فنر
P_P	گام فنر پس از پیش‌تنظیم	ρ	چگالی
P_{SC}	گام فنر حاصل از شبیه‌سازی	t	زمان شکل‌دهی فنر
P_{SP}	گام فنر حاصل از شبیه‌سازی پیش‌تنظیم	V_f	سرعت تغذیه مفتول
E	مدول یانگ	V	سرعت ساچمه
G	مدول برشی	C_d	سرعت موج طولی
S_{13}, S_{23}	مولفه‌های تنش برشی	r	شعاع مفتول فنر
C	ماتریس میرایی	h	ضخامت قطاع فنر در ساچمه‌زنی
M	ماتریس جرم	μ_S	ضریب اصطکاک در ساچمه‌زنی
ζ	نسبت میرایی	μ_C	ضریب اصطکاک در شکل‌دهی فنر
Δt	نمو زمانی پایدار	L_e	طول المان
		L	طول مفتول فنر
		a	طول قطاع فنر در ساچمه‌زنی
		b	طول ناحیه برخورد در ساچمه‌زنی
		α	فاکتور میرایی متناسب با جرم

فصل ۱ مقدمه

۱-۱ مقدمه

فنها یکی از مهم‌ترین، پرکاربردترین و حساس‌ترین قطعات هر ماشین هستند. در بین اجزای سیستم تعلیق خودرو، می‌توان مهم‌ترین جزء را فنر آن دانست [۱]. فنرها با توجه به نوع کاربردشان، ممکن است تحت شرایط بارگذاری شدید استاتیکی یا دینامیکی قرار گیرند. به همین دلیل توجه و دقت در طراحی و بهبود فرایند ساخت آن‌ها از اهمیت شایانی برخوردار است. تنش پسماند^۱ ایجاد شده در فرایند تولید فنر نقش مهمی در عملکرد آن ایفا می‌کند. آگاهی از چگونگی اثر مراحل فرایند تولید روی تنش پسماند، یک گام ضروری به سوی رسیدن به یک بهینه‌سازی مناسب در طراحی و فرایند تولید می‌باشد.

۲-۱ تنش پسماند

تنش‌های پسماند تنش‌هایی هستند که بر اثر انجام عملیات خاصی در جسم باقی می‌مانند و در حالی که جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست نیز وجود دارند. چون تنش‌های پسماند توسط تغییرشکل پلاستیک غیریکنواخت تولید می‌شوند، بررسی تنش‌های پسماندی که در هر فرایند فلزکاری ایجاد می‌شود، اهمیت دارد. تنش پسماند عموماً نماینده میدان‌های تنشی تک‌محوری یا چندمحوری در یک سیستم بسته، بدون وجود هیچ‌گونه نیرو یا گشتاور خارجی است. طبیعت تنش پسماند به گونه‌ای است که در مقابل هر تنش کششی، تنش فشاری نیز باید وجود داشته باشد، به گونه‌ای که جسم در حالت تعادل باقی بماند.

علت اینکه شناسایی چنین تنش‌هایی برای ما مهم است این است که وقتی جسم تحت بار خارجی قرار می‌گیرد، این تنش خارجی به تنش پسماند موجود افزوده می‌شود. پس اگر در منطقه‌ای تنش پسماند کششی داشته باشیم و بارگذاری نیز تنش کششی باشد سطح تنش در آن منطقه بالاتر از آنچه که تنها با لحاظ کردن تنش کششی خارجی به دست می‌آید خواهد بود. لذا در صورتی که تنش کششی پسماند

^۱ Residual stress

داخلی را در نظر نگیریم و قطعه را تنها بر اساس تنش اعمالی خارجی طراحی کنیم ممکن است در اثر تنش‌های خارجی تنش در قطعه از حد تسلیم آن بالاتر رفته و باعث شکست آن گردد. همچنین، در مواردی که قطعه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد، همانند یک فنر مارپیچ، توزیع تنش‌های پسماند می‌تواند بر عمر قطعه موثر باشد [۲].

تنش‌های پسماند به وسیله‌ی چهار عامل مکانیکی، گرمایی، پوشش‌دهی و ماشین‌کاری به وجود می‌آیند [۳، ۴]. تنش‌های پسماند، تنش‌های الاستیک هستند. حداکثر مقداری که یک تنش پسماند می‌تواند به آن برسد تنش تسلیم (فعلی) ماده است. فلزات شامل تنش‌های پسماند با گرم کردن تا دمایی که در آن دما استحکام تسلیم ماده برابر یا کمتر از مقدار تنش پسماند است، تنش‌زدایی می‌شوند. بنابراین ماده می‌تواند تغییرشکل دهد و تنش را رها کند [۲].

محاسبه دقیق تنش‌های پسماند در فرایندهای پیچیده، توسط روش‌های تحلیلی مشکل است و بنابراین معمولاً این تنش‌ها توسط انواع روش‌های تجربی تعیین می‌شوند. روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به صورت مخرب، نیمه مخرب و یا غیر مخرب هستند. روش اصلی غیرمخرب برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند پرتونگاری با اشعه X^1 است. در این روش، از اشعه X برای تعیین فاصله بین اتمی دسته‌ای مشخص از صفحه‌های شبکه، در ماده‌ی کرنش کرده، استفاده می‌شود. تنش‌های پسماند می‌توانند از مقایسه فاصله اندازه‌گیری شده در ماده دارای تنش پسماند، با فاصله موجود در نمونه فاقد تنش محاسبه شوند [۲]. سایر روش‌های غیر مخرب اندازه‌گیری تنش پسماند عبارتند از: روش آلتراسونیک^۲، پراش

^۱ X-ray diffraction

^۲ Ultrasonic

نوترونی^۱ و روش سیگنال بارک هاوزن^۲. همچنین روش‌های سوراخ‌کاری^۳، روش حلقه-هسته^۴ و سوراخ‌کاری عمیق^۵ نیمه مخرب و روش کانتور^۶ و برش‌زنی^۷ مخرب می‌باشند [۵، ۶].

۳-۱ فنر لول

فنر یک عضو مکانیکی است که انرژی حاصل از اعمال بار خارجی را در خود جذب کرده و سپس رها می‌سازد. این عضو مکانیکی در صنعت کاربردهای بسیار متنوع و مهمی داشته و مهمترین انواع فنرها عبارتند از فشاری، کششی، خمشی و پیچشی (شکل (۱-۱)).



شکل (۱-۱) انواع فنرهای مکانیکی [۷]

^۱ Neutron diffraction

^۲ Barkhausen noise method

^۳ Hole drilling technique

^۴ Ring-core method

^۵ Deep hole drilling method

^۶ Contour method

^۷ Sectioning technique