

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

تحلیل حذف تنشهای پسماند ایجاد شده توسط فرآیندهای ماشینکاری به کمک روشهای ارتعاشی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

مهدی جعفری وردنجانی

استاد راهنما

دکتر مصطفی غیور



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشگاه مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک آقای مهدی جعفری
تحت عنوان

**تحلیل حذف تنشهای پسماند ایجاد شده توسط فرآیندهای ماشینکاری یا جوشکاری به کمک
روشهای ارتعاشی**

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر

۲- استاد مشاور پایان نامه دکتر

۳- استاد داور دکتر

۴- استاد داور دکتر

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات، و
نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه،
متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
شش	فهرست مطالب
نه	فهرست علائم
۱	چکیده
	فصل اول : مقدمه
۲	۱-۱- تاریخچه
۳	۱-۲- مزایای روشهای ارتعاشی حذف تنش پسماند
۳	۱-۳- کاربردهای روشهای ارتعاشی حذف تنش پسماند
۴	۱-۴- بررسی برخی کارهای انجام شده
۹	۱-۵- تعریف مسئله
	فصل دوم : بررسی پدیده تنش زدائی ارتعاشی از منظر تجربی
۱۱	۲-۱- مقایسه ای بین تأثیر فرآیندهای تنش زدایی حرارتی و ارتعاشی
۱۱	۲-۱-۱- عملیات حرارتی
۱۱	۲-۱-۲- تنش زدایی ارتعاشی
۱۲	۲-۱-۳- تست کشش
۱۲	۲-۱-۴- تست ضربه
۱۳	۲-۱-۵- تست سختی
۱۳	۲-۱-۶- متالوگرافی
۱۳	۲-۱-۷- نتایج مقایسه
۱۴	۲-۲- استندهای عملی فرایند تنش زدایی ارتعاشی
۱۴	۲-۳- فرآیند تنش زدائی ارتعاشی در صنعت
۱۶	۲-۳-۱- روش متعارف فرآیند VSR
۱۷	۲-۳-۲- شرکت ماشین ابزارسازی اینگرسول

۲۰.....	۲-۳-۳-کارخانه ولکان.....
۲۴.....	۲-۳-۴-شرکت ساخت محصولات آلیاژی.....
۲۶.....	۲-۳-۵-سازمان استاندارد دیویس.....
۲۹.....	۲-۳-۶-صنایع MH EB.....
۳۴.....	۲-۴-۴-برخی نکات عملی مهم.....
۳۴.....	۲-۴-۱-جنسهای مناسب.....
۳۶.....	۲-۴-۲-مدت زمان مناسب جهت انجام فرآیند.....
۳۶.....	۲-۴-۳-محدودیت‌های فرآیند.....
۳۶.....	۲-۴-۴-معیاری برای تشخیص زمان اتمام فرآیند.....
۳۶.....	۲-۴-۵-نحوه برپائی تجهیزات و انجام آزمایش.....
۳۷.....	۲-۴-۶-ابعاد مناسب.....
۳۷.....	۲-۴-۷-آیا می‌توان این روش را جایگزین روش حرارتی کرد؟.....
	فصل سوم : تحلیل تئوریک تنش زدائی ارتعاشی
۳۸.....	۳-۱- معرفی.....
۳۸.....	۳-۲- فرضیات مربوط به تحلیل عددی.....
۴۱.....	۳-۳- ایجاد تنشهای پسماند.....
۴۴.....	۳-۴- کاهش تنشهای پسماند.....
۵۰.....	۳-۵- نتایج تحلیل تئوری.....
۵۰.....	۳-۵-۱- نتایج تحلیل تئوری برای آلومینیوم ۲۰۲۴.....
۵۱.....	۳-۵-۲- نتایج تحلیل تئوری برای آلومینیوم ۷۰۷۵.....
	فصل چهارم : بررسی نتایج شبیه سازی و آزمایشات تجربی
۵۳.....	۴-۱- شبیه سازی.....
۵۴.....	۴-۱-۱- نتایج شبیه سازی برای آلومینیوم ۲۰۲۴.....
۶۱.....	۴-۱-۲- نتایج شبیه سازی برای آلومینیوم ۷۰۷۵.....
۶۶.....	۴-۲- نتایج عملی.....

۷۲-۱-۲-۴- نتایج عملی مربوط به آلومینیوم ۲۰۲۴، برای فرآیند ماشینکاری ۷۲

۷۴-۲-۲-۴- نتایج عملی مربوط به آلومینیوم ۷۰۷۵، برای فرآیند ماشینکاری ۷۴

۷۵-۳-۲-۴- مقایسه نتایج ۷۵

۷۶-۳-۴- مقایسه نتایج بخش عملی ۷۶

۷۷-۴-۴- نتایج بدست آمده توسط داوسون ۷۷

فصل پنجم : نتیجه گیری

۷۶-۱-۵- نتیجه گیری ۷۶

۷۹-۲-۵- پیشنهادات ۷۹

پیوستها :

۸۰- پیوست الف - خروجیهای بدست آمده از آزمایش نفوذ نانو ۸۰

۸۰- الف-۱- آلومینیوم ۲۰۲۴ ۸۰

۸۰- الف-۲- آلومینیوم ۲۰۲۴ ۸۰

۸۲- مراجع ۸۲

فهرست علائم

b	عرض تیر
c	عمق تیر
da	المان عرضی سطح مقطع تیر، در جهت ارتفاع
E	مدول الاستیسیته
E_T	مدول مماسی الاستیوپلاستیک
h_1	عمق فاز پلاستیک، پس از اعمال خمش اولیه
h_2	عمق فاز پلاستیک، پس از اعمال خمش ثانویه
I	ممان اینرسی سطح مقطع تیر
M	گشتاور
M_1	خمش اولیه (جهت اعمال تنش پسماند اولیه)
M_2	خمش ثانویه (جهت اعمال سیکل اول بارگذاری نوسانی)
M_e	گشتاور حد الاستیک تیر
O_z	محور عرضی تیر
R	شعاع انحنای تیر
y	فاصله از محور خشی
β	نسبت مدول الاستیسیته به مدول مماسی الاستیوپلاستیک
ε_e	کرنش حد الاستیک
$(\varepsilon_e)_2$	کرنش حد الاستیک ثانویه
ε_{xx}	کنش خطی در صفحه X و در جهت X
σ	تنش
σ_1	تنش اولیه
σ_e	تنش حد الاستیک
$(\sigma_e)_2$	تنش حد الاستیک ثانویه
σ_{ir}	تنش پسماند اولیه
σ_{rb}	تنش اعمال شده در هنگام اعمال خمش ثانویه
σ_{rf}	تنش پسماند نهایی
σ_{ul}	تنش حداکثر
ψ	انحنای محور خشی تیر

چکیده

اصولاً پس از انجام تمام فرآیندهای ساخت، یکسری تنشهای پسماند در محصول ایجاد میشود، که با توجه به فرآیند ساخت انجام شده، این تنش های پسماند، توزیع خاص خود را خواهند داشت. جهت رسیدن به دقت و کیفیت ابعادی مطلوب، در محصول، نیاز است که تنشهای پسماند، تا حد قابل توجهی حذف شوند. از جمله فرآیندهای تنش زدایی، که پس از انجام فرآیند ساخت، در قطعه انجام میشود، میتوان به تنش زدایی حرارتی و ارتعاشی اشاره کرد. اساس عملکرد هر دوی این روشها، از این جهت که بخشی از قطعه، یا کل آنرا وارد فاز پلاستیک کرده، با بروز تغییرشکلهای محلی پلاستیک، کسری از تنشهای پسماند را آزاد میکنند، مشابه است. روند کار به این صورت است که تنش ناشی از بارهای حرارتی یا ارتعاشی، با تنشهای پسماند جمع شده، از حد تنش تسلیم می گذرد. هدف این پروژه، که بر روی تنش گیری ارتعاشی متمرکز شده است، بررسی پارامترهای اصلی روش تنش زدایی ارتعاشی، که شامل دامنه یا میزان بار، فرکانس اعمال بار، و تعداد سیکل است، می باشد. روند کلی مسئله به این صورت است که قطعه ای که دارای تنش پسماند است، تحت فرآیند تنش گیری ارتعاشی، قرار گرفته، تأثیر پارامترهای مذکور، در میزان کاهش تنشهای پسماند آن، مورد بررسی قرار میگیرد.

بررسی و تحلیل مسئله مذکور، بر روی یک تیر یکسرگیردار انجام میشود. اینکار در سه فاز تحلیلی، شبیه سازی، و عملی صورت می گیرد. برای بخش تحلیل تئوری، ابتدا یک ممان خمشی، تنشهای پسماند را در تیر ایجاد کرده، توزیع تنش و کرنش بدست می آید. سپس سیکل اول بارگذاری، به کمک اعمال یک بار خمشی معکوس، بر روی تیر، اعمال شده، از طریق روابط مربوط، مقدار کاهش تنش پسماند پس از اعمال اولین سیکل فرآیند تنش زدایی، برای تیر یکسرگیردار، از جنسهای مورد نظر، بدست می آید. آنگاه اثر پارامترهای بارگذاری ارتعاشی، بر میزان کاهش تنش پسماند، بررسی میشود. برای شبیه سازی با نرم افزار آباکوس، پارامترهای فرآیند تنش زدایی ارتعاشی، برای هر سه پارامتر زمان، بار، و فرکانس، بصورت کامل (۴۸ آزمایش)، برای تیر یکسرگیردار از جنسهای مورد نظر مورد ارزیابی قرار میگیرد، و مقادیر بهینه پارامترها بدست می آید. سپس نتایج این شبیه سازی، بصورت غیر مستقیم، با نتایج آزمایش عملی انجام شده برای تیر یکسر گیردار، که ابتدا ماشینکاری شده، سپس تحت بارگذاری نوسانی قرار گرفته است، مورد بررسی قرار میگیرد. در این مقایسه از خواص سختی و ضریب الاستیسیته جسم، که توسط دستگاه نفوذ نانو بدست می آید، استفاده شده است. نتایج هر سه بخش تقریباً مطالب مشابهی را در مورد پارامترهای اصلی مشخص می کنند، و آن اینست که مدت زمان کمتر، و فرکانسهای پائینتر از تشدید، به همراه بار متوسط نتایج مطلوبتری از نظر کاهش تنش پسماند، ارائه می دهند.

واژگان کلیدی: تنش زدایی ارتعاشی، تنش پسماند، ماشینکاری، جوشکاری

فصل اول

مقدمه

تنش گیری به کمک ارتعاشات، سالیان دراز است که بعنوان جایگزینی برای تنش گیری حرارتی، جهت کاهش تنشهای پسماند مورد استفاده قرار گرفته است. تحقیقات انجام شده، شامل طیف وسیعی از آزمایشات میشود. محدوده این آزمایشات از جمله تست ساده خستگی نمونه هایی که تنشهای پسماند آنها توسط روش پرتاب ساچمه یا خمش پلاستیک کاهش یافته است، تا تستهای ارتعاشی بر روی قطعات ریخته گری و جوشکاری شده، گسترده شده است. فرآیندهای تجاری معمولاً شامل بستن قطعه کار به یک موتور الکتریکی لنگ و ارتعاش آن در فرکانسهای متفاوت رزونانس برای مدت پانزده دقیقه است. سازندگان ادعا میکنند که پس از انجام $V.S.R^1$ ، بر روی قطعات ریخته گری شده، ماشینکاری شده و یا جوشکاری شده با وزنی در حد چند تن، اعوجاج بسیار کمتری رخ میدهد. [۱]

۱-۱- تاریخچه

از سال ۱۹۴۳، در طول جنگ جهانی دوم، مزایای کاربردی ارتعاشات، تا حدودی آشکار شد. سازه های جوشکاری شده، که از طریق راه آهن، یا توسط کامیون، از محل ساخت، به محل اجرا، منتقل میشدند، در هنگام ماشینکاری، اعوجاج کمتری از خود نشان می دادند. آلمانها، پس از آغاز جنگ، فرآیندی را بنام، "انتقال پس از جوشکاری"، که بر روی اجزای دقیق بزرگ انجام میشد، برای محصولات خود، معرفی کردند. مدیران و مهندسان کارخانجات دلیل این پدیده را نمی دانستند، ولی فکر میکردند، که این پدیده ممکن است، در نتیجه جابجایی قطعه کار، رخ داده باشد. آنها شروع به انجام آزمایش کرده، روشهایی را جهت ایجاد جابجایی کنترل شده، ابداع کردند.

¹ Vibrational Stress Relief

۱-۲- مزایای روشهای ارتعاشی حذف تنش پسماند

از مزایای این فرآیند، به صورت کلی، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عمر خستگی قطعه را افزایش می دهد. شواهد نشان می دهد که یک فرآیند ارتعاشی مؤثر، قابلیت قطعه کار را برای تحمل بارگذاری و حفظ ابعاد، افزایش می دهد.
- زحمت خیلی کمتری نسبت به تنش گیری حرارتی داشته، از سرعت، انعطاف پذیری، و قابلیت بالاتری برخوردار است.
- مشکلات مربوط به ابعاد قطعه کار، و عدم دسترسی به کوره های بزرگ جهت تنش گیری این قطعات بزرگ را مرتفع میکند.
- منجر به انجام کار اضافی برای آماده سازی سطح قطعه کار، از قبیل پرتاب ساچمه، که بعد از تنش گیری حرارتی مورد نیاز است، نخواهد شد.
- مهندسان طراح را قادر می سازد، اجزاء تجهیزات مکانیکی را با به کارگیری چند آلیاژ مختلف بسازند، چرا که این فرآیند، تنش گیری اجزاء چند جنسی را به همان سادگی اجزاء تک جنسی، عملی می کند. عموماً این قابلیت، در تنش گیری حرارتی وجود ندارد. با استفاده از تنش گیری ارتعاشی، آلیاژهایی که تحت تنش گیری حرارتی (بدلیل افت خواص فیزیکی، یا هیدروژن تردی)، دچار مشکل می شوند، حتی امکان ترکیب با یکدیگر خواهند داشت.
- این مزایا، فقط بخشی از مزایای تنش زدایی ارتعاشی بوده، این فرآیند تا حد چشمگیری، مصرف انرژی را کاهش میدهد. درصد عمده ای از کوره های تنش گیری حرارتی، از منابع بزرگ گازی استفاده می کنند (بخش ناچیزی از آنها از انرژی الکتریکی بهره می برند). تنها در ایالات متحده، انرژی صرف شده برای تنش گیری حرارتی در هر سال، معادل انرژی لازم برای گرم کردن ۸ میلیون خانه است. با استفاده از تنش گیری حرارتی، مصرف انرژی بسیار کاهش یافته، اتلاف انرژی ناچیزی خواهیم داشت.

۱-۳- کاربردهای روشهای ارتعاشی حذف تنش پسماند

کاربردهای رایج تنش زدایی ارتعاشی، در زمینه های زیر است :

- بسترها و ستونهای ماشین ابزار
- ابزارهای مورد استفاده در صنایع خودروسازی و فضایی
- محفظه های پمپ
- تجهیزات توربینهای آبی
- ماشین آلات کاغذ سازی
- تجهیزات مورد استفاده در معادن
- تجهیزات بزرگ جوشکاری شده
- اجزای زیردریایی ها
- اجزای بزرگ و حساس

علاوه بر اینکه این فرآیند، نسبت به فرآیندهای کوره ای سنتی، بر روی اجزای بزرگ حساس، از کارائی بالاتری برخوردار است، تنش زدایی ارتعاشی، هم محدوده محصولات فلزی قابل تولید، و هم کاربردهایی را که از تنش زدایی مؤثر بهره مند میشوند، توسعه داده است. این وسعت نه تنها از نظر هزینه، بلکه از نظر ابعاد یا پیکربندی قطعات نیز می باشد.

محدوده گسترده اجزای فلزی و کاربردهای آن، شامل موارد زیر است :

- اجزائی که نمی توان آنها را بدلیل ابعاد بزرگی که دارند، در کوره های موجود تحت تنش زدائی قرار داد، و یا جابجایی آنها بسیار هزینه بر است. همچنین، تنش گیری ارتعاشی، این امکان را پدید آورده است که بتوان، طراحی محصولات را بصورت تک قطعه انجام داد.
- اجزائی در ماشین ابزار که بایستی بعد از خشن تراشی، جهت کاهش اثرات تنشهای ماشینکاری، که از رسیدن به تolerانسهای نهایی جلوگیری می کنند، تنش زدایی شوند.
- آماده سازی ورقه ها جهت برش لیزر، به منظور کاهش اعوجاجهایی که در فرآیند برش اختلال ایجاد میکنند.
- اجزائی که بدلیل عدم دسترسی به امکاناتی چون پاکسازی لایه های اکسید شده قطعاتیکه در کوره قرار گرفته اند، نمیتوان آنها را به کمک فرآیندهای حرارتی، تنش زدایی کرد.
- اجزای دو فلزی یا چند فلزی، که بدلائل فیزیکی، نمیتوان آنها را جهت تنش زدایی، تحت فرآیندهای حرارتی قرار داد.
- اجزائی که جهت آماده سازی برای ماشینکاری نهایی، کارسختی سطحی شده اند؛ فرآیند کارسختی سطحی، خود باعث بروز تنشهای پسماندی میشود که در رسیدن به تolerانسهای نهایی ماشینکاری، اختلال ایجاد میکنند.
- برای جنس فلزاتی که طراحان ماشین ابزار نیاز به استفاده آنها در قسمتهایی از ماشین ابزار داشتند، ولی بدلیل اینکه این فلزات قابلیت تنش زدائی حرارتی نداشتند، معمولاً از بکارگیری آنها در ماشین ابزار، خودداری می کردند.

۱-۴- بررسی برخی کارهای انجام شده

نخستین کار منسوب به مک گولدریک و ساندرس [۲] در سال ۱۹۴۰ است که بر روی قابهای جوشکاری شده و ریخته گری شده انجام پذیرفت. گرچه نتایج کمی قابل استفاده ای ارائه نکرد، به این نتیجه رسید که تنش زدایی ارتعاشی بستگی به بروز پدیده تغییر شکل پلاستیک در حین فرآیند تنش گیری دارد. لذا جهت رسیدن به این هدف می بایست از دامنه های رزونانس معینی استفاده کرد. این نتایج توسط مور، با استفاده از تیرهای مخروطی یکسر گیردار نیز تأیید شده است. این نویسنده پیشنهاد کرد که آزادسازی تنش ممکن است به درجه ای از تغییر شکل پلاستیک وابسته باشد.

فوش و ماتسون در سال ۱۹۴۶ [۳]، تنشهای پسماند را از طریق فرآیندهای پرتاب گلوله و پیچش پلاستیک، روی فنرهای پیچشی (میله های گرد و مستقیم) ، اعمال کردند. گرچه تنشهای پسماند تا میزان کمی کاهش یافتند، لیکن در کل، آزادسازی چشمگیری پس از اعمال بار نوسانی پیچشی رخ نداد. نمونه ها در همان جهتی که تنشهای پسماند ایجاد شده بودند، اعمال شدند، لذا هر تغییر شکل پلاستیکی در جهت بارگذاری، بجای اینکه در کاهش تنشهای پسماند مؤثر باشد، منجر به افزایش آنها میشد.

یکسری نتایج جامع مربوط به کاهش تنشهای پسماند، در حین بارگذاری متناوب تیرهای مربعی فولاد نرم، و یک آلیاژ آلومینیوم-مس سختکاری شده، توسط پاتینسون، در سال ۱۹۶۲ ارائه شد [۴]. آنها شواهدی را ارائه کردند که نشان میداد قسمتی از آزادسازی تنش، میتواند حتی قبل از رسیدن مجموع تنشهای اعمالی (پسماند و متناوب)، به حد الاستیک رخ دهد.

در اوائل دهه ۱۹۶۰، بوهرلر و فالزگراف [۵]، ۴ مقاله در این مورد ارائه دادند، که در مورد انجام آزمایشات مختلف بر روی قطعات ریخته گری و جوشکاری شده بود. گرچه نتایجی که آنها بدست آوردند، قطعیت بالایی نداشت، لیکن توانستند تنشهای پسماند را هنگامیکه تنشهای تکرارشونده را تا نزدیکیهای حد خستگی فولاد افزایش دادند، تا حد ۲۰ درصد بیش از پیش کاهش دهند. مشخص است که آنها بدلیل محدودیتی که از نظر حد خستگی قطعه وجود داشت، مجبور به خودداری از اعمال مقادیر تنشی بالا جهت حذف تنشهای پسماند در حد قابل توجه، بودند. آدیوان [۶] نشان داد که آهن ریخته گری شده، در نتیجه فرآیند ارتعاشی در زمان طولانی تری ابعاد خود را حفظ میکند، اگرچه او نیز مانند بوهرلر و فالزگراف، از نظر تسلیم احتمالی قطعه در حین فرآیند، محدود بود. آنها جهت رفع این مشکل راه حلی ترکیبی، شامل عملیات حرارتی و ارتعاشی، ارائه دادند.

لوکشین [۷] توانست در سال ۱۹۶۵ تا حد ۷۰ درصد، تنشهای پسماند را در یک حلقه آلومینیومی ریخته گری شده پیش بار داده شده، از بین ببرد که برای این کار از یک تنش تکرارشونده رزونانسی استفاده کرد. او نتیجه گرفت که آزادسازی محلی تنش در حین فرآیند ارتعاشات، تعادل تنشی داخلی را بر هم زده، باعث توزیع مجدد تنش و کاهش کلی سطح تنش میشود.

تأثیر فرآیند ارتعاشی بر روی تغییرشکل محصولات ریختگی آهنی، در سال ۱۹۶۷ توسط اسکازنیک، بررسی شد. این نتیجه بدست آمد که فرآیند ارتعاشی، زمان لازم برای توقف تغییرات ابعادی محصولات ریختگی را نسبت به فرآیند حرارتی، تا نصف کاهش میدهد [۸].

در سال ۱۹۶۸ استراچان [۹]، پس از فرآیند ارتعاشی، به یک کاهش ۸۰ درصدی تنشهای پسماند در فولادهای نرم، یک کاهش ۶۰ درصدی تنشهای پسماند، در فولاد زنگ نزن AISI نوع ۳۰۴ جوشکاری شده، و یک کاهش اندک تنشهای پسماند در فولاد مارتزیتی (HY-80) جوشکاری شده، دست یافت. دو نوع نمونه در این کار استفاده شد، یک صفحه دایروی دارای خط جوش دایروی، و یک ورقه طویل، دارای دو خط جوش موازی.

شاید بهترین تحقیق موجود در رابطه با این موضوع تا سال ۱۹۸۰، توسط وانزنی و کرامر [۱۰]، تهیه شده بود. آنها توانستند تنش پسماند موجود در یک تسمه آلومنی گلوله باران شده با ابعاد $0.05 \times \frac{3}{4} \times 3$ اینچ $(13 \times 19 \times 76$ میلیمتر) را که در معرض خمشهای تکرارشونده، در بین دو تکیه گاه گیردار قرار داشت، تا ۳۳ درصد کاهش دهند. ارزش کار آنها در این بود که آنها توانستند توضیح تقریباً قابل قبولی برای خصوصیات رفتار نرم شوندگی ماده بیابند. گرچه استفاده از یک منحنی تنش کرنش بدست آمده برای ماده، نشان داد که با اطلاع از میزان تنش اولیه، دامنه تنش تکرار شونده اعمال شده و شرایط کرنش نهایی، آنها میتوانند میزان کاهش تنش پسماند را پیش بینی کنند.

در سال ۱۹۷۱، ساگالویچ [۱۱]، توانست بوسیله فرآیند ارتعاشی، تنشهای پسماند ایجاد شده در بدنه واگنهای ساخته شده از ورقه های فولاد نرم را کاهش دهد. او بر اساس معادلات حاکم بر آرایش مجدد بازگشت ناپذیر اتمهای داخل شبکه کریستالی تحت بار، به یک رابطه نیمه تجربی، دست یافت. تنشهای پسماند نهایی پیشینی شده پس از فرآیند ارتعاشی، تنها ۱۰ تا ۱۵ درصد مقادیر اندازه گیری شده بود. جزئیات کمی در رابطه با پارامترهای تئوری روابط، ارائه شد.

گرازد در سال ۱۹۷۲ [۱۲]، کاهش تنشهای پسماند بوسیله ارتعاشات را در ورقه های جوشکاری شده تحت بررسی قرار داد. این نتیجه بدست آمد که بیشتر تنشها در طول دقیقه اول کل آزمایش (۳ دقیقه) بدست آمد. پس از اینکه ارتعاشات ادامه پیدا کرد، تنشها یکنواخت تر شده، آزادسازی تنش، در بخشهای مختلف نقاط جوشکاری شده، تا حدود بیشتری انجام شد. مکانیزم کاهش تنشهای پسماند جوشکاری شده در ورقهای مربعی تحت فرآیند بارگذاری پالسی، توسط کازیمیرو [۱۳]، بررسی شد. یک رابطه تئوری جهت پیش بینی مقدار تنشهای پسماند نهایی پس از بارگذاری پالسی عمودی، روی سطح ورقه، بدست آمد. نویسندگان تحلیلهای خود را بر اساس الاستیسیته خطی پایه گذاری کردند، و سعی کردند آثار پلاستیک را از طریق استقرار، در تحلیل دخیل کنند. رابطه شامل سه پارامتر بود که بطور صریح تعریف نشده بودند ولی ظاهراً به دیاگرام تک محوره تنش کرنش مربوط میشدند. مقدار تنش نهایی پیش بینی شده از طریق روابط، با نتایج عملی مقایسه نشد.

طبق گفته زوبکنکو (۱۹۷۴)، سازه های جوشکاری شده فولادی بزرگ، پس از انجام فرآیند ارتعاشی تا حدود ۷۰ درصد، تنشهای پسماند خود را از دست دادند [۱۴]. کاهش در تنشهای پسماند در سازه، متناظر با کاهش در فرکانس طبیعی بود. همچنین این قضیه مشخص شد که فرآیند VSR، حتی برای اتصالات لب به لب یا منحنی که بیشتر در معرض تمرکز تنش هستند، تأثیر بسیار کمی (در حد صفر)، بر روی حد خستگی دارد.

کار بعد مربوط به ویس [۱۵] میشود. او آزمایش خود را بر روی یک دیسک فولادی کم کرین، به قطر ۳۰۶ میلیمتر و ضخامت ۱۲ میلیمتر، که به یک دیسک با قطر ۱۰۳ میلیمتر، بروش زیرپودری جوش داده شده بود، انجام داد، کاهش چشمگیری را در تنشهای پسماند ایجاد شده توسط جوش مشاهده کرد. نمونه ها توسط یک دستگاه لرزاننده آزمایشگاهی بزرگ، ارتعاش داده شدند.

در سال ۱۹۷۶ کلاکستون [۱۶]، ویژگیهای اساسی فرآیند تنش زدایی ارتعاشی را شرح داده، آنها را با روشهای حرارتی آزادسازی تنش مقایسه کرد. آنها تأکید کردند که روشهای ارتعاشی نمیتواند جایگزینی برای همه روشهای گرمایی باشد اما یک عملیات تکمیلی بشمار می آید که برای کاربردهای خاص، کارایی بیشتری نسبت به روشهای گرمایی داشته اند. نویسنده مزایای عملی و محدودیتهای تنش زدایی ارتعاشی را با استفاده از مثالهای نو، در مقایسه با فرآیند حرارتی بررسی کرد. به این نکته نیز اشاره شد که اطلاعات کمی در خصوص مکانیزم تنش زدایی ارتعاشی و اینکه چگونه فرآیند تنش - زدایی ارتعاشی اثر خود را بر ماندگاری ابعادی و کاهش تنشها می گذارد، وجود دارد. لذا این کمبود دانش خود منجر به کاهش اطمینان نسبت به این فرآیند شده است.

بوتروس [۱۷]، در سال ۱۹۸۰، اثر ارتعاشات را بر الگوی تنش پسماند ایجاد شده توسط جوشکاری سازه های از جنس فولاد نرم، مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که بکارگیری یک فرآیند ارتعاشی مناسب، برای یک سازه جوشکاری شده از جنس فولاد نرم، برای مدت زمان ۱۵ دقیقه، قلّه های تنشهای پسماند را در سازه جوشکاری شده تا حد زیاد

کاهش داد. این نکته اشاره شد که الگوی تنش، در اثر کاهش قله های بلند در جوش، به یکنواختی بیشتری دست یافت. نتایج این تحقیق از این واقعیت که تنشهای پسماند نتیجه غیر یکنواختی تغییرشکل‌های پلاستیک بوده، ارتعاشات بوسیله تغییر ابعاد سازه، تنشهای دینامیک را جهت کاهش درجه غیریکنواختی، القا میکند، نیز حمایت کرد. کاربرد شرایط ارتعاش اجباری در هنگام آنبیل کردن لوله های جوشکاری شده، توسط واهی [۱۸]، بررسی شد. شبیه سازی عددی لوله های جوشکاری شده بکار گرفته شده، تغییرات ایجاد شده در تنشهای پسماند، ناشی از ارتعاشات اجباری، در نظر گرفته شد. جنس لوله ها تعیین نشد. هدف مطالعه، ارزیابی ارزش شرایط ارتعاشی، بعنوان یک روش ممکن برای کاهش تنشهای پسماند، با، یا بدون عملیات حرارتی بود. شبیه سازی عددی بوسیله روشهای ديفرانسیلی محدود صریح، دوبعدی، انجام شد. توزیع تنشهای پسماند نهایی، بوسیله روش مذکور، ارزیابی شدند. این نتایج با یک مورد استاندارد که نه ارتعاشات اجباری و نه عملیات حرارتی روی آن انجام گرفته بود، مقایسه شدند. موردی که ارتعاشات و عملیات حرارتی را با یکدیگر ترکیب کرده بود، بهترین نتیجه، و موردی که ارتعاشات سرد (بدون عملیات حرارتی همزمان) را بکار برده بود، بدترین نتیجه را از نظر آنبیل در بر داشت. مکانیزم مشروح، اثرات کارسختی یا خزش را در تحلیل دخیل نکرد. اما به این نکته اشاره شد که خزش، تنشهای پسماند را کاهش میدهد در حالیکه اثر کارسختی مشخص نشد. این نتیجه بدست آمد که استفاده از ارتعاشات اجباری، بدون ارزش نخواهد بود و نیاز به بررسیهای بیشتری دارد.

یک مکانیزم اتمی توسط پروهازسکا [۱۹]، در سال ۱۹۷۵، در مورد کاهش تنشهای داخلی در سازه های جوشکاری ساخته شده از فولاد نرم، توسط تنش زدایی ارتعاشی ارائه شد. نویسندگان این تحقیق، پیشنهادی در مورد علت کاهش تنشهای بیشینه مواد چند کریستالی حاوی تنشهای داخلی، توسط ارتعاشات دادند. کاهش تنشهای پسماند، مربوط به کاهش تعداد کل نابجائیهای درون سازه مورد نظر، میشود.

در سال ۱۹۸۲، تحقیق دیگری که بازم بر اساس ساختار اتمی بود، در مورد کاهش تنشهای پسماند، در مواد تک کریستالی صورت گرفت. این مسئله توسط تاگارت [۲۰]، بررسی شد. تک کریستالهای چهار گوش مس، جهت ایجاد شرایط تنش پسماند مختلف، در معرض خمش یکنواخت قرار گرفتند. تک کریستالهای کرنش یافته، مانند یک تیر یک سر گیردار، جهت اطمینان از اثر فرآیند ارتعاشی، تحت ارتعاش قرار گرفتند. با مقایسه تغییرات میکروسختی حالت اولیه بدون تنش نسبت به حالت تنش دار، و حالت تنش دار نسبت به حالت ارتعاش داده شده، تنشهای داخلی نزدیک به سطح نمونه، بصورت کیفی نمایش داده شدند. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که اندازه گیری میکروسختی راه صحیحی جهت اطمینان یافتن از وجود تنشهای پسماند است؛ بطوریکه یک افزایش در میکروسختی، نشان دهنده یک افزایش در تنشهای داخلی، و کاهشی در میکروسختی بیان کننده کاهش در میدان تنش پسماند است. سپس اندازه گیری میکروسختی جهت نشان دادن این امر که ارتعاشات میتواند اثر کارسختی تنشهای پسماند را کاهش دهد و کاهش تنشهای پسماند در کریستالهای تکی مسی، اندک است، بکار گرفته شد. با توجه به مکانیزم آزادسازی تنش، نویسندگان بر این باورند که جریان پلاستیک کریستالوگرافی که طی لغزش اولیه و ثانویه در حین بخشی از سیکل رخ میدهد، نقش بسزایی در اساس فرآیند تنش زدایی ارتعاشی دارد.

در سال ۱۹۸۲ یک نظر سنجی کلی به همراه تحلیل چندین مورد مشخص از کاربرد تنش زدایی ارتعاشی برای سازه های بزرگ توسط کلاوبا [۲۱]، انجام گرفت. اینکار ثابت کرد که اثرات متالورژیک فرآیند تنش زدایی ارتعاشی قابل چشم پوشی بوده، هیچ تغییری در میکروساختار و خواص مکانیکی یا عمر خستگی رخ نمیدهد. آنها همچنین به این امر اشاره کردند که هدف و اثر عمده فرآیند تنش زدایی ارتعاشی، ارتقای پایداری ابعادیست، به این صورت که تنها شدت تنشهای پسماندیکه منجر به ایجاد مشکل ابعادی میشوند کاهش یابد.

داوسون [۲۲]، در تز دکترای خود، بمنظور اندازه گیری تغییرات آنها در سطح مقطع، تکنیکی برای ایجاد توزیع تنشی پسماند یکنواخت در تیرهای یکسر گیردار، ابداع کرد. او بصورت موازی نیز بر روی آزمایش خمش آهسته، که همراه با شبیه سازی سیکلهای اولیه ارتعاشات بود، کار کرد. نتیجه این شد که روشهای تنش زدایی ارتعاشی، قادر به حذف تقریباً کامل تنشهای سطحی، در نمونه های نورد گرم و سرد شده، از جنس فولاد نرم، و یک نوع آلیاژ آلومینیوم (Al-Si-Mg-Mn) هستند. نتایج بدست آمده برای این موارد بقدری مشابه بود که نویسندگان به این باور رسیدند که نتایج بیشتر سازه های فلزی که توسط فرآیند ارتعاشات تنش زدایی میشوند، به همان صورت خواهد بود. همچنین این نتیجه بدست آمد که بیشترین سطح آزادسازی تنش (۲۰ تا ۵۰ درصد)، در سیکل اول، سطح کمتری (۲۵ تا ۳۰ درصد) در سیکل دوم، و باقی آزاد سازی در سیکلهای بعدی صورت میگیرد. نتیجه مهم دیگر این کار این بود که جهت آزادسازی تنشی ارتعاشی، نیاز به رسیدن به یک حد بحرانی کرنش سیکلی، و حد خستگی ماده داریم، و در این راستا، نمونه باید از نظر خستگی متحمل صدماتی، هرچند کوچک شود.

در سال ۲۰۰۱، مانسی [۲۳]، کارهای گسترده ای را در زمینه آزادسازی تنشهای پسماند برای قطعات جوشکاری شده انجام داد و به آزادسازی تنش گسترده ای دست یافت. این کار با اعمال فرکانسهایی با دامنه زیاد عملی شد. اما از آنجاییکه جهت دستیابی به آزادسازی کامل، نیاز به اعمال فرکانس طبیعی وجود دارد و در این آزمایش دامنه های فرکانس بالا اعمال شده بود، آزادسازی کامل صورت نگرفت.

کوانگ [۲۴]، در سال ۲۰۰۲ توسط نرم افزار انسیس، آزادسازی تنش توسط ارتعاش را به کمک مدل المان محدود، با فرض گسترش تنشها با صرف نظر از گسترش تنشهای ناشی از جوش، تحلیل کرد. تا کنون مدلی وجود نداشته است که از قابلیت مدلسازی فرآیند جوشکاری و تنش زدایی ارتعاشی برخوردار باشد.

در سال ۲۰۰۶، شیگرو اوکی [۲۵]، فرکانسهای مختلف بارگذاری نوسانی را بر روی خط جوش مابین دو ورقه جوش داده شده، اعمال کرده، به کمک تفرق اشعه ایکس، تنشهای پسماند موجود در جوش را اندازه گیری کرد، و کاهش تنشهای پسماند را مشاهده کرد. او در پایان، به کمک یک روش تحلیلی نیز کار خود را مورد بررسی قرار داد. مدل تحلیلی بکار گرفته شده شامل جرم و فنرهای پیش بار داده شده است، که دارای خواص الاستو-پلاستیک می باشد. در این مدل تحلیلی نیز، کاهش تنشهای پسماند، مشاهده می شود.

یانگ [۲۶] در سال ۲۰۰۸، در یک پژوهش علمی که به منظور درک بهتر فرآیند بارگذاری ارتعاشی انجام شد، تنشهای پسماند ناشی از جوش را شبیه سازی کرده، فرکانسهای تشدید و زیرتشدید را در نرم افزار اعمال نمود. تأثیر دامنه ارتعاشی و فرکانس، به کمک مدل شبیه سازی شده، تحت بررسی قرار گرفت. نتیجه بدست آمده نشان می داد که هم

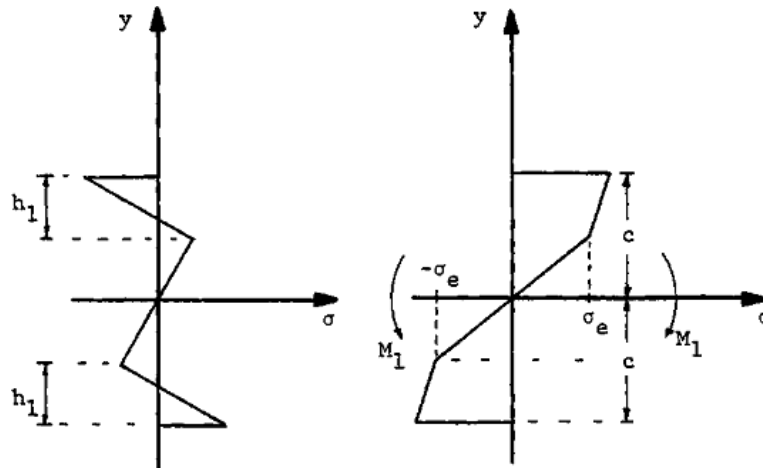
فرکانس شدید و هم فرکانس زیرتشدید، قادر به کاهش تنش های پسماند هستند. این نکته نیز مشاهده شد که برای فرکانس های زیر تشدید، کاهش تنش، وابستگی زیادی به دامنه ارتعاش دارد.

یک مدل پلاستیسیته جهت شبیه سازی پدیده آزادسازی ارتعاشی تنش، در سال ۲۰۰۹ توسط اس. و فی ارائه شد. این مدل بر این اساس تعریف شده است که نیروی خارجی ارتعاشی، تنشهای متناوبی را که بر روی تنشهای پسماند موجود در ماده، تأثیر میگذارند، ایجاد میکند. لذا هنگامی آزادسازی تنش رخ میدهد که مجموع تنشهای متناوب ایجاد شده و تنشهای پسماند، از تنش نهایی محلی ماده، تجاوز کند. از آنجائیکه تنشهای پسماند، دارای تعادل هستند، آزادسازی محلی تنش، به بازسازی توزیع تنش منجر شده، تعادل جدیدی ایجاد میشود. در این کار توسط نرم افزار متلب، نشان داده میشود که تنش زدایی ارتعاشی یک پدیده پلاستیک محلی است که جنبه های فرآیندهای آزادسازی تنش تناوبی، و خزش را با یکدیگر ترکیب میکند، به این صورت که تنش ماکزیمم هنگامیکه کرنشها افزایش می یابند، کاهش می یابد. [۲۷]

۱-۵- تعریف مسئله

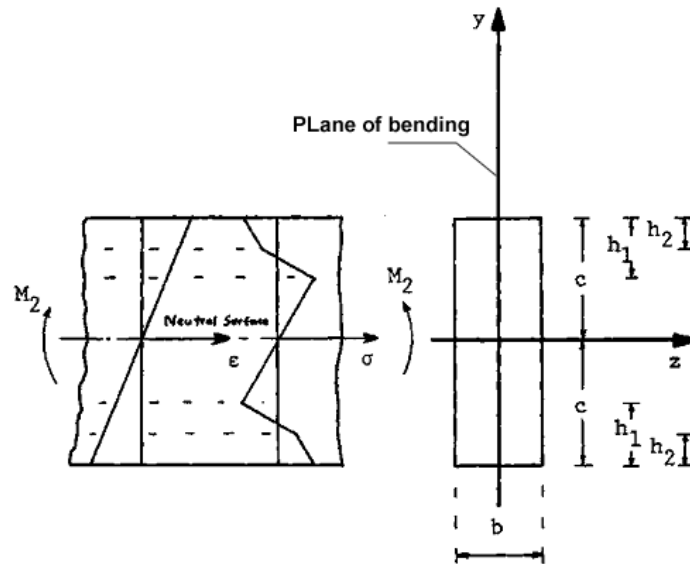
هدف اصلی این تحقیق، تحلیل اثر بارهای متناوب و ارتعاشات، بر میزان کاهش تنشهای پسماند موجود در قطعاتیست، که تحت فرآیندهای ساخت (ماشینکاری، جوشکاری، و...) دچار تنش پسماند شده است. روند کلی کار به این صورت است که ابتدا یک عامل خارجی (یک فرآیند ساخت، که میتوان آنرا ممان، فشار، یا نیرو خواند)، تنشهای پسماند را بر روی جسم (تیر یکسر گیردار) اعمال میکند. سپس عامل خارجی دیگری (بار متناوب)، وارد عمل شده، با توجه به تعداد سیکل (زمان)، فرکانس، و میزان بار اعمال شده، تنشی در تیر ایجاد میکند. این تنش با تنشهای پسماند موجود در جسم، جمع شده، بخش عمده ای از آنها از حد تنش پلاستیک، تجاوز کرده، قسمت قابل توجهی از تنشهای پسماند موجود در جسم آزاد میشود.

اینکار در سه فاز تحلیل تئوری، شبیه سازی، و عملی صورت می گیرد. در مرحله اول کار، یک ممان خمشی خالص (M_1)، که تیر را تا عمق h_1 وارد فاز پلاستیک میکند، بر تیر وارد شده، پس از باربرداری، توزیع تنش پسماند، به کمک روابط الاستیک، نمودارهای تنش-کرنش ایده آل، و تشابهات هندسی، در تیر بدست می آید (شکل ۲-۱). در مرحله بعد، بار خمشی معکوس (M_2)، که تیر را تا عمق h_2 وارد فاز پلاستیک میکند، بر تیر وارد شده (شکل ۲-۲)، پس از رها سازی تیر، توزیع تنشی پسماند حاصل، بدست می آید. کاهشی که پس از اعمال خمش ثانویه، در مقدار تنشهای پسماند بدست می آید، همان کاهشی است که همواره در تحلیلهای انجام شده، به عنوان بزرگترین کاهش محسوب میشود، چرا که طبق نتایج موجود، درصد عمده کاهش، در تنشهای پسماند، در تنش زدایی ارتعاشی، در همان سیکل اول رخ میدهد. لذا این تحلیل، از اعتبار بالایی جهت مقایسه با آزمایش برخوردار است.



(الف) توزیع تنش هنگامیکه ممان خمشی اعمال شده است. (ب) توزیع تنش پسماند اولیه هنگامیکه ممان خمشی برداشته میشود.

شکل ۱-۲ توزیع تنش، در هنگام اعمال گشتاور M_1 و پس از آن [۳۰]



(الف) سطح مقطع تیر که h_1 و h_2 را نشان میدهد. (ب) توزیع تنش و کرنش در مقطع تیر هنگامیکه ممان خمشی، معکوس میشود.

شکل ۲-۲ توزیع تنش، در هنگام اعمال گشتاور M_2 [۳۰]

برای شبیه سازی، پارامترهای فرآیند تنش زدایی ارتعاشی، در نرم افزار آباکوس، برای یک تیر یکسر گیردار از جنسهای مورد نظر، برای هر سه فاکتور (تعداد سیکل، فرکانس، و بار)، شامل دو فاکتور چهار سطحی، و یک فاکتور سه سطحی، بصورت کامل (۴۸ آزمایش) مورد ارزیابی قرار میگیرد، و سطوح بهینه پارامترها بدست می آید. سپس نتایج این شبیه سازی، با نتایج آزمایش عملی انجام شده برای تیر یکسر گیردار، که ابتدا ماشینکاری شده، سپس تحت بارگذاری نوسانی قرار گرفته است، مورد بررسی قرار میگیرد. در این مقایسه از خواص سختی و ضریب الاستیسیته جسم، که توسط دستگاه نفوذ نانو بدست می آید، استفاده شده است.

فصل دوم

بررسی پدیده تنش زدایی ارتعاشی از منظر تجربی

در این قسمت، کارهای عملی انجام شده در زمینه پدیده تنش زدایی ارتعاشی، از زوایای گوناگون و بصورت موردی تحت بررسی قرار گرفته، به کمک دلائل و شواهد تجربی و آماری، نه تنها صحت مزایای آن اثبات میشود، بلکه تردیدهای مربوط به عیوبی که احتمالاً ممکن است این فرآیند بر روی محصول داشته باشد، مردود میگردد.

۱-۲- مقایسه ای بین تأثیر فرآیندهای تنش زدایی حرارتی و ارتعاشی

در اینجا به مقایسه نتایج یک آزمایش انجام شده توسط دو روش حرارتی و ارتعاشی که بر روی قطعات جوشکاری شده از جنس فولاد کربنی ASTM A 106، انجام شد، و ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۱-۲ ارائه شده است، می پردازیم.

جدول ۱-۲ ترکیبات شیمیایی فولاد ASTM A-106 گرید B [۲۸]

عناصر	درصد حداکثر	عناصر	درصد حداکثر
کربن	۰/۳۰	سولفور	۰/۰۳۵
منگنز	۱/۰۶	سیلیکون	۰/۱۰
فسفر	۰/۰۳۵		

۱-۱-۲- عملیات حرارتی

عملیات حرارتی، در یک کوره آزمایشگاه متالورژیک، طبق استاندارد ASME /ANSI B31-3، انجام شد [۲۸]

۲-۱-۲- تنش زدایی ارتعاشی

عملیات، طبق مراحل مندرج در دفترچه دستورالعمل تجهیزات VSR انجام پذیرفت. [۲۸]