

بررسی فرآیند تنش‌زدایی ارتعاشی، مدهای مختلف آن و مقایسه با تنش-گیری حرارتی

محمد خوران
مربی
مجتمع صنعتی اسفراين
Mokhoran@gmail.com

عیسی خوران*
کارشناسی ارشد
دانشگاه باهنر کرمان
Eisa.khoran@gmail.com

نوید صفرپور
کارشناسی ارشد
دانشگاه تهران، شرکت خاور پرس
Safarpour.navid@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵

چکیده

تنش باقیمانده تنشی است که بر اثر انجام عملیات خاصی در جسم باقی می‌ماند و در حالیکه جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست نیز وجود دارد. چون تنش‌های باقیمانده توسط تغییر شکل مومسان غیریکنواخت تولید می‌شوند، بررسی تنش‌های باقیمانده‌ای که در هر فرآیند فلزکاری ایجاد می‌شوند، اهمیت دارد. مهمترین دلایل بوجود آمدن تنش‌های باقیمانده را می‌توان از دیدگاه منشاء حرارتی، مکانیکی و تغییر فاز بررسی نمود. برای از بین بردن تنش‌های باقیمانده موجود در قطعات می‌توان از تنش‌گیری حرارتی، فشاری، ارتعاشی، سرمایش زیر صفر، چکش‌کاری، کششی و پیر کردن طبیعی استفاده نمود. متداولترین روش مورد استفاده برای حذف تنش‌های باقیمانده، تنش‌زدایی حرارتی می‌باشد، اما این روش دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. روشی که اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته، روش تنش‌زدایی ارتعاشی است. پارامترهای تاثیرگذار در تنش‌زدایی ارتعاشی؛ دامنه ارتعاشات، اندازه و گردایان تنش پسماند و تعداد سیکل‌های اعمالی می‌باشد. مهمترین پارامتر تاثیرگذار، دامنه ارتعاش می‌باشد. هدف تحقیق پیشرو بررسی و مقایسه دو روش تنش‌زدایی حرارتی و تنش‌زدایی ارتعاشی و نتیجه‌گیری از بحث می‌باشد.

واژگان کلیدی: تنش باقیمانده، فرکانس هارمونیک، تنش‌زدایی حرارتی، تنش‌زدایی ارتعاشی، دامنه ارتعاشات

۱. مقدمه

قطعات وجود دارد که در میان آنها روش تنش‌گیری حرارتی بیشترین کارایی را در صنعت دارد. روش دیگری که امروزه به آن بهای بیشتری داده شده و استفاده از آن در تمامی صنایع‌ها مهم مهندسی رشد روز افزونی داشته است، روش تنش‌گیری ارتعاشی مواد می‌باشد. هر کدام از این روش‌ها

وجود تنش‌های باقیمانده در قطعات سبب می‌شود قطعات، ثبات ابعادی خود را از دست داده، عمر کاری آنها کم شود و در تنش‌های کمتری از حد طراحی شده شکسته شوند. در نتیجه می‌توان گفت که حذف تنش‌های باقیمانده از قطعات حساس و مهندسی امری حیاتی جهت بهبود کارایی آنها می‌باشد. روش‌های متعددی برای کاهش تنش‌های باقیمانده

دارای مزایا و معایبی هستند که در قسمت‌های بعدی به آنها پرداخته خواهد شد [۱].

شروع تحقیقات بوسیله روش اجزای محدود بوسیله فردی به نام هان^۱ در سال ۲۰۰۲ صورت گرفته است. قابل ذکر است تا قبل از آن عموم تحقیقات در خصوص تنش‌گیری ارتعاشی بر اساس تجربه بوده است [۲]. در ادامه این تحقیقات توسط شرکت بونال^۲ ادعا شد که تنش‌گیری ارتعاشی به مراتب نسبت به سایر روش‌های دیگر مناسب‌تر است، بصورتی که مقدار تنش باقیمانده در قطعات کمتر خواهد بود. به منظور سنجش شرایط واقعی، شبیه‌سازی سه بعدی توسط غلامحسین فرهی صورت گرفت. شبیه‌سازی صورت گرفته بهبود تنش‌گیری در حالت‌های استفاده از فرکانس طبیعی نسبت به فرکانس رزونانس را اعلام کرده است [۳]. قطعاتی که بوسیله ارتعاش تنش‌گیری شده‌اند در صنایع مختلفی از جمله هوا و فضا، اتومبیل‌سازی، صنایع ریل‌سازی، پل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند [۴]. ذکر این نکته ضروری بنظر می‌رسد که از تنش‌گیری ارتعاشی به طور موفقیت آمیزی در قطعات تولید شده بوسیله ریخته‌گری، فورج، جوشکاری و ماشینکاری استفاده شده است [۵]. نکته قابل توجه این است که تنش‌گیری ارتعاشی در سال‌های اخیر بر روی فولادهای ساده کربنی [۶]، فولاد ۳۰۴ زنگ نزن [۷]، آلیاژهای آلومینیوم [۸]، فولاد ۳۱۶ [۹] و فولاد L ۳۱۴ [۱۰] صورت گرفته است. روند رو به رشد استفاده از تنش‌گیری ارتعاشی در صنعت سبب شده است تا از این روش حتی در قطعات جوشکاری شده به ابعاد بزرگ که تنش پسماند حاصل از جوشکاری بالایی دارند نیز بجای تنش‌گیری حرارتی استفاده شود [۱۱].

از جمله مباحث و ابهاماتی که همچنان در مورد روش تنش‌گیری ارتعاشی وجود دارد این است که آیا این روش جایگزین مناسبی برای روش‌های تنش‌گیری حرارتی است؟ آیا این روش در واقعیت سبب کاهش میزان تنش‌های پسماند در قطعات می‌شود؟ جهت انجام تنش‌گیری ارتعاشی باید به چه مواردی توجه کرد تا نتیجه بهینه را گرفت؟. هدف اصلی این

پژوهش پاسخگویی کامل به موارد گفته شده می‌باشد. برای رسیدن به این مهم نیاز است که ابتدا به شناخت تنش، تنش باقیمانده، روش‌های تنش‌گیری و... پرداخته شود. این پژوهش در واقع جمع‌بندی مناسبی از اطلاعات و تحقیقاتی است که توسط محققان و شرکت‌های مختلفی در دنیا انجام گرفته است.

۲. تنش باقیمانده

با توجه به تعریفی که در قسمت قبل بیان گردید نمی‌توان با مفهوم تنش باقیمانده در قطعات آشنا شد. برای درک کردن موضوع تنش باقیمانده در مواد، نیاز است که از دیدگاه دیگری به بررسی خواص ماده و رفتار آنها پرداخته شود. بدیهی است که در اثر گرم شدن مواد، انبساط و افزایش دامنه حرکتی اتم‌ها رخ می‌دهد و در اثر انقباض برعکس. این اثرها یکدیگر را خنثی می‌کنند. حال فرض کنیم که در اثر حرارت دادن قطعات، دامنه حرکتی اتم‌ها زیاد شده و ماده منبسط گردد اما در اثر سرد شدن قطعه، بنا به هر دلیلی، یکی از اتم‌ها به جای خود برنگردد. بدلیل ایجاد بی‌نظمی در قطعه ایجاد شده سیستم ناپایدار است. یعنی تمایل دارد که انرژی خود را از دست بدهد. در نتیجه این عامل، اتم سعی می‌کند که به جای خود برگردد تا انرژی سیستم کاهش یابد. به نیرویی که این اتم یا اتم‌ها به سیستم اعمال می‌کنند تا به مکان اصلی خود برگردند، تنش باقیمانده گفته می‌شود [۱۲]. البته این مثال یکی از ساده‌ترین روش‌های توجیه وجود تنش‌های باقیمانده در قطعات می‌باشد و موارد دیگر مربوط به وجود نابجایی‌ها و... می‌شوند که از حوصله این تحقیق خارج است.

۲-۱. دلایل ایجاد تنش‌های باقیمانده در قطعات

۲-۱-۱. تنش‌های ناشی از تغییر فاز

بعضی مواد مانند فولادها در اثر گرم و سرد شدن تغییر فاز و ساختار می‌دهند. این مواد اگر به صورت موضعی گرم شوند، یک قسمت از ماده تغییر ساختار داده و به تبع آن تغییر حجم

می‌دهد و تمایل دارد که منبسط یا منقبض شود اما قسمت-های دیگر در برابر این تغییر حجم مقاومت کرده و سبب ایجاد تنش باقیمانده در قطعات می‌شوند [۱۳].

فرآیندهای تولید قطعات مانند نورد، فورج سرد، جوشکاری، ماشینکاری و... هر کدام به نوعی می‌توانند سبب ایجاد تنش-های باقیمانده در قطعات شوند [۱۴].

۲-۱-۲. تنش‌های باقیمانده می‌توانند ناشی از گرمایش و سرمایش کنترل نشده مواد باشند [۱۵].

اگر یک ماده با سرعت کمی گرم شده و با سرعت کمی نیز سرد گردد، احتمال ایجاد تنش‌های باقیمانده در آن بسیار کم می‌شود. اما اگر یکی از موارد بالا به سرعت رخ دهد در آن تنش‌های باقیمانده ایجاد می‌شوند.

۳-۱-۲. گرم و یا سرد کردن موضعی مواد (وجود فیکسچر در حین گرم و یا سرد کردن قطعه)

این مورد که بیشتر ناشی از انجام جوشکاری بر مواد می‌باشد به این دلیل رخ می‌دهد که یک قسمت از ماده در اثر گرم شدن موضعی تمایل زیادی به منبسط شدن دارد و این درحالی است که قسمت‌های دیگر قطعه به دلیل خنک بودن از این افزایش سایز جلوگیری می‌کنند [۱۶، ۱۲].

۲-۲. تاثیر تنش‌های باقیمانده بر خواص مواد

در اثر وجود تنش‌های باقیمانده در قطعات در آنها اعوجاج و پیچیدگی ایجاد می‌شود. این عامل سبب می‌شود تا قطعه دقت ابعادی خود را از دست دهد. همچنین تغییر شکل پلاستیک قبل از رسیدن به مقدار تنش تسلیم رخ می‌دهد. عدم ماشینکاری مناسب قطعات تنش‌دار مورد بعدی است که می‌توان به آن اشاره کرد [۱۴، ۱۳، ۲]. مورد بعدی کاهش عمر کاری قطعات می‌باشد. بدیهی است که عمر کاری قطعات را با بحث مقاومت خستگی آنها اندازه‌گیری می‌کنند و هرچه مقاومت یک ماده در برابر پدیده خستگی بیشتر باشد، عمر کاری مفید آن نیز بیشتر است. در مورد پدیده خستگی باید

گفت، هرچه تنش‌های باقیمانده موجود در سطح قطعه بیشتر باشند. عمر خستگی قطعه کمتر خواهد بود [۳، ۱۲].

۳. روش‌های حذف تنش‌های باقیمانده در قطعات

روش‌های بسیاری برای حذف تنش‌های باقیمانده در قطعات استفاده می‌شوند که در اینجا به اختصار به آنها اشاره می‌شود و در قسمت بعدی بعضی روش‌ها مورد شرح بیشتری قرار می‌گیرند.

۳-۱-۱. روش تنش‌گیری حرارتی

این روش را به اختصار تی. اس. آر. می‌نامند. در این روش قطعات تا دماهایی نسبتاً بالا حرارت داده شده و در این دماها تحت زمان‌های مشخصی نگهداری می‌شوند، سپس قطعات به آرامی در کوره سرد می‌گردند. این روش متداول‌ترین روش برای حذف تنش‌های باقیمانده (تنش‌های پسماند) در قطعات می‌باشد [۱۷].

۳-۲. روش پیر کردن طبیعی

قبل از شناخته شدن روش تنش‌گیری حرارتی این روش متداول‌ترین روش تنش‌گیری قطعات شناخته می‌شد. در این روش قطعات را امروز تولید کرده و بین ۶ ماه تا دو سال بعد مصرف می‌کنند [۱۸].

۳-۳. روش سرمایش زیر صفر^۴

در این روش قطعات را تا حدود 200°C - سرد کرده و بعد تا 200°C گرم می‌کنیم. بعد از تکرار این روش، تنش‌های ایجاد شده در قطعات حذف شده و یا به مقادیر بسیار زیادی کاهش می‌یابند [۱۸].

۳-۴. روش کششی

در این روش قطعات تحت کشش قرار می‌گیرند تا حدود ۱.۵ درصد تغییر شکل در آنها ایجاد شود. سپس تنش وارده به

قطعه قطع می‌گردد. با انجام این عمل تنش‌های باقیمانده موجود در قطعه حذف خواهند شد. استفاده از این روش برای قطعات ساده و نازک امکان پذیر است [۱۸].

۳-۵. روش فشاری

در تنش‌زدایی فشاری، قطعات تحت تنش فشاری تا حدود ۷ درصد کرنش طولی، تغییر شکل پیدا می‌کنند. سپس تنش اعمالی به قطعات حذف می‌شود. در نتیجه انجام این عمل، تنش‌های باقیمانده موجود در قطعات حذف می‌شوند [۱۸].

۳-۶. چکش کاری

با انجام چکش کاری و ایجاد تنش‌های فشاری، تنش‌های کششی موجود در قطعات کم شده و در نتیجه عمر خستگی قطعات افزایش می‌یابد چکش کاری می‌تواند به صورت دستی، برقی، التراسونیک و یا... باشد. یکی از مزیت‌های روش چکش کاری این است که می‌توان از آن در بین انجام جوشکاری لایه‌های مختلف استفاده کرد. در واقع برای جوش‌های چند لایه‌ای بهتر است که بعد از اعمال هر پاس جوشکاری، به غیر از پاس ریشه و پاس رویی، عملیات چکش کاری انجام شود [۱۹، ۱۸، ۱۳].

۳-۷. تنش‌گیری ارتعاشی

در این روش قطعات تحت ویبره قرار می‌گیرند و بعد از گذشت چند دقیقه تا چند ساعت تنش‌های موجود در قطعات حذف شده و قطعه تنش‌زدایی می‌شود. این روش خود دارای چندین زیرگروه می‌باشد [۲۰]. از جمله روش‌های تنش‌گیری ارتعاشی می‌توان به روش هارمونیک، روش هارمونیک تابع^۵، روش ویبره نامنظم، روش ویبره با دامنه ثابت و... اشاره کرد [۲۱].

۴. تنش‌گیری حرارتی

تنش‌گیری حرارتی که به فرآیند آنیل کردن یا آنیل تنش-گیری نیز مرسوم است، متداول‌ترین روش حذف تنش‌های باقیمانده در قطعات می‌باشد.

برای انجام عمل تنش‌گیری در این روش، قطعات در کوره قرار داده شده و تا دمای مشخصی، که این دما تابعی از جنس ماده است، حرارت داده می‌شوند. این عمل برای مدت زمانی که تابعی از سایز قطعه است، انجام می‌گردد. پس از پایان این مراحل، قطعات با تمهیدات خاصی به آرامی سرد می‌شوند تا دوباره در آنها تنشی ایجاد نگردد.

۴-۱. دلایل حذف تنش‌های باقیمانده در قطعات

توسط عملیات حرارتی

چند دلیل برای این اتفاق می‌توان بیان کرد اول اینکه با گرم شدن قطعات نوسانات اتمی زیاد شده، حرکت اتم‌ها راحت‌تر شده و در نتیجه اتم‌هایی که در مکان‌های خود قرار نداشته بودند به مکان اصلی خود بازگشته و سبب می‌شوند سیستم انرژی از دست داده و تنش‌زدایی شود. دومین مورد که بیشتر مورد نظر دانشمندان نیز است بر این واقعیت استوار است که حداکثر تنشی که قابلیت ذخیره شدن در یک ماده را دارد برابر با تنش تسلیم ماده می‌باشد. یعنی تنش‌های باقیمانده در قطعه نمی‌توانند بیشتر از مقدار تنش تسلیم باشند. از طرفی می‌دانیم که تنش تسلیم مواد تابعی از دما است و تقریباً برای همه مواد با افزایش درجه حرارت تنش تسلیم کاهش می‌یابد. با تلفیق کردن دو مورد بالا می‌توان گفت که چگونه تنش‌های باقیمانده در قطعات پس از عملیات حرارتی کاهش می‌یابند. با گرم کردن مواد تنش تسلیم آنها کاهش می‌یابد و از طرفی گفته شد که تنش‌های داخلی نمی‌توانند بیشتر از تنش تسلیم باشند. در نتیجه در این دماها، تنش‌های موجود در قطعات از حد تسلیم گذشته و سبب ایجاد تغییر شکل‌های میکرونی و گاهی ماکرونی می‌گردند. به همین دلیل میزان تنش‌های باقیمانده در قطعات کاهش می‌یابد (تنش-های باقیمانده سبب ایجاد تغییر شکل‌های میکرونی یا ماکرونی در دماهای بالا می‌شوند و دیگر تنشی وجود نخواهد داشت که بعد از سرد شدن در قطعه بماند). حال اگر قطعه سرد شود اگرچه که تنش تسلیم آن افزایش می‌یابد اما دیگر تنشی بصورت داخلی در قطعه وجود نخواهد داشت [۲۲].

همانطور که گفته شد روش تنش‌گیری حرارتی، متداول‌ترین روش حذف تنش‌های باقیمانده در قطعات و سازه‌ها است. اما این روش دارای محدودیت‌هایی است که در زیر به آنها اشاره خواهد شد.

۲-۴. محدودیت‌های روش تنش‌گیری حرارتی

۲-۴-۱. هزینه زیاد

اولین موردی که بدان باید اشاره شود هزینه زیادی است که روش تنش‌زدایی حرارتی به دنبال دارد. هزینه نگهداری کوره، روشن کردن آن، هزینه ارسال و دریافت قطعات تا کارگاه عملیات حرارتی کننده و... این روزها قیمت گاز رفته رفته بیشتر شده و بیشتر هم خواهد شد.

۲-۴-۲. زمان

یکی از معایب فرآیند تنش‌گیری حرارتی این است که این فرآیند نیاز به صرف زمان‌های طولانی بین چندین ساعت تا چندین روز (ده- دوازده) دارد. دقت شود که این زمان ذکر شده زمان ارسال و برگشت قطعه از کارگاه عملیات حرارتی را هم شامل می‌شود و زمان خالص برای عملیات حرارتی قطعات نهایتاً ۱ تا ۲ روز می‌باشد.

۲-۴-۳. ایجاد اعوجاج در قطعات

بطور معمول انتظار می‌رود که قطعات در اثر گرم شدن پیچیده و تابیده شوند یا به اصطلاح علمی‌تر در آنها اعوجاج ایجاد گردد. بدیهی است که برگرداندن این اعوجاج و حذف آن بسیار سخت‌تر از رخ دادن آن می‌باشد. یکی از دلایل ایجاد اعوجاج در قطعات را می‌توان اینگونه بیان کرد، قطعاتی که دارای مناطقی با ضخامت‌های مختلف هستند بدلیل اینکه زمانیکه در کوره قرار می‌گیرند، همه مناطق آنها با یکدیگر گرم و سرد می‌شوند در نتیجه منطقه نازک زمان بیشتری در دماهای بالا قرار می‌گیرد و بنابراین احتمال پیچش آن بیشتر می‌شود.

۲-۴-۴. آلودگی محیط زیست

استفاده از کوره‌هایی با سوخت فسیلی (که تقریباً تمام کوره‌های عملیات حرارتی صنعتی را شامل می‌شوند) سبب افزایش آلودگی محیط زیست شده که تبعات سنگینی را در دراز مدت بجا می‌گذارند.

۲-۵. نیاز به تمیزکاری نهایی

بدلیل اینکه اصولاً قطعات در حین تنش‌گیری حرارتی در دماهای بالا قرار می‌گیرند و در دماهای بالا سرعت اکسیداسیون قطعات خیلی بیشتر است، سطح قطعات اکسید می‌شود که در مورد اکثر مواد این رخداد باعث از بین رفتن کیفیت سطحی و ایجاد سطحی خشن می‌گردد. در نتیجه بعد از فرآیند تنش‌گیری حرارتی نیاز است تا قطعات یک بار دیگر تحت فرآیند تمیزکاری سطحی قرار گیرند تا به کیفیت‌های مورد نظر برسند.

۲-۶. تغییر در خواص مکانیکی

بعضی از قطعات و آلیاژها برای رسیدن به خواص مشخص و مخصوصی تحت فرآیندهای مکانیکی، ترمومکانیکی و حرارتی قرار گرفته‌اند. چنانچه این قطعات تحت فرآیند تنش‌گیری حرارتی قرار گیرند، احتمال زیادی وجود دارد که تغییر محسوسی در خواص مکانیکی آنها ایجاد شود و در نتیجه این عمل کارایی خود را از دست بدهند. برای تنش‌گیری این مواد اصولاً نمی‌توان از تنش‌گیری حرارتی استفاده کرد [۱۸].

۲-۷. عدم کارایی در مورد تنش‌زدایی فولادهای

زنگ نزن آستینیتی

فولادهای زنگ نزن آستینیتی را به دو دلیل تحت فرآیند عملیات تنش‌گیری قرار نمی‌دهند. اول اینکه این خانواده از فولادها در اثر گرم شدن احتمال می‌رود که تحت پدیده‌ای به نام حساس شدن قرار گیرند در نتیجه خواص مقاومت به خوردگی آنها تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش شدیدی را از خود نشان دهد. دومین مورد اینکه در فولادهای زنگ نزن آستینیتی به دلیل اینکه قابلیت جوشکاری افزایش پیدا کند، در ترکیب طوری تنظیم می‌شود که مقداری فاز فریت در فلز

جوش ایجاد شود تا از ایجاد ترک‌های گرم جلوگیری شود. با گرم کردن فولاد زنگ نزن آستینیتی که در جوش آنها مقادیری از فریت باشد، این احتمال وجود دارد که این فریت، به فریت زیگما تبدیل شده و سبب ایجاد تردی در قطعات و ساختار شود [۲۳].

۴-۲-۸. محدودیت ابعاد قطعات و تجهیزات

به هر حال هر کوره عملیات حرارتی دارای ظرفیتی از لحاظ ابعاد یا وزن می‌باشد که مقادیر بالاتر از آن را نمی‌توانند از عملیات حرارتی استفاده کنند. این محدودیت سبب می‌شود تا توانایی تنش‌گیری حرارتی قطعات حجیم وجود نداشته باشد.

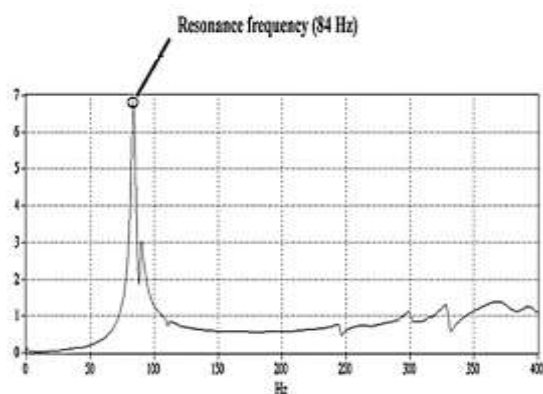
۵. تنش‌گیری ارتعاشی

این روش با استفاده از ویبره کردن قطعه یا تجهیز سبب کاهش و یا حذف تنش‌های باقیمانده در آنها می‌شود. در واقع یک موتور الکتریکی مولد ویبره به تجهیز متصل شده و لرزش را به قطعه منتقل می‌کند. در اثر این عمل بعد از گذشت زمانی، قطعات تنش‌زدایی می‌شوند [۲۴].

اما اینکه از چه فرکانسی برای ویبره کردن و لرزاندن قطعات استفاده کنیم هنوز بعد از گذشت ۶۰-۷۰ سال از ابداع این روش در حاله‌ای از ابهام است. برای درک بهتر تاثیر ویبره کردن بر ساختار و تنش‌های موجود در قطعات ابتدا باید عکس‌العمل مواد در اثر انجام ویبره بر روی آنها مورد مطالعه قرار گیرد.

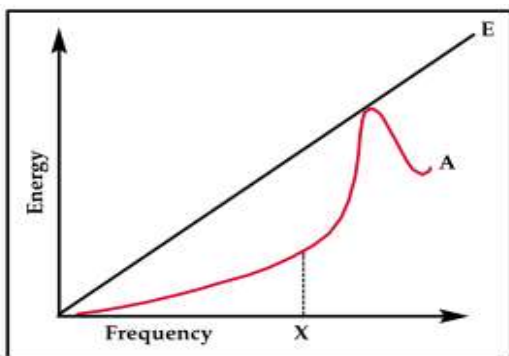
اگر یک قطعه تحت ویبره شدن قرار گیرد، درون آن ارتعاشاتی در مقیاس سلول‌های واحدشان ایجاد می‌شود. این ارتعاشاتی که ایجاد می‌شوند هر کدام دارای دامنه حرکتی و تنشی مختلفی هستند. ابتدا که قطعه، تحت ویبره شدن قرار می‌گیرد، در مقابل این افزایش انرژی مقاومتی از خود نشان می‌دهد و مانع از همسازگی این ویبره‌ها با یکدیگر و در نتیجه افزایش چشم‌گیر دامنه آنها می‌شود. هرچه که فرکانس ویبره شدن افزایش پیدا کند، دامنه ارتعاشات ایجاد شده هم

تقریباً به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. این مورد تا زمانی ادامه دارد که انرژی ناشی از ویبره کردن قطعات بر انرژی مقاومت قطعه در مقابل ویبره شدن غلبه پیدا کند. زمانی که این پدیده رخ دهد، ویبره‌های ایجاد شده در قطعه همساز^۶ شده و در نتیجه دامنه ارتعاشات آنها افزایش چشمگیری را از خود نشان می‌دهد. شکل ۱ نشان دهنده نمودار تغییرات دامنه ارتعاشات درون قطعه نسبت به فرکانس ویبره‌های اعمال شده به قطعه می‌باشد. به بزرگترین پیکی که در این نمودار دیده می‌شود. پیک هارمونیک گفته می‌شود [۲۵،۲۶].



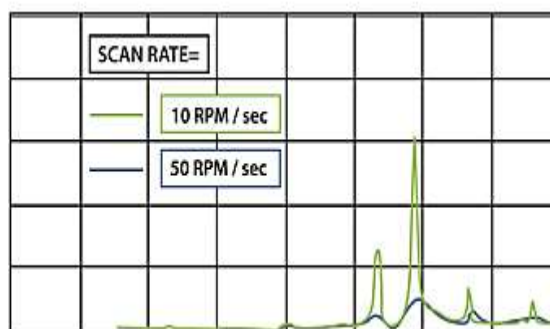
شکل ۱. نشان دهنده تغییرات دامنه ارتعاشات درون قطعه نسبت به تغییرات فرکانس ویبره کردن [۸].

شکل ۲ نیز نشان می‌دهد که انرژی ناشی از ویبره کردن قطعات مادامی که فرکانس ویبره افزایش می‌یابد، افزایش پیدا می‌کند. اما دامنه ارتعاشی ایجاد شده در قطعه تا یک حدی به صورت تقریباً خطی افزایش پیدا کرده و بعد از آن پیک هارمونیک را ایجاد می‌کند.



شکل ۲. نشان دهنده تغییر در انرژی انتقالی به قطعه و همچنین دامنه ارتعاشات موجود در قطعه [۲۶].

بهترین و متداولترین روش بدست آوردن پیک همساز قطعات، روش اسکن کردن می‌باشد. در این روش همانطور که گفته شد تغییراتی در میزان فرکانس ایجاد و پیره توسط موتور الکتریکی داده شده و در مقابل آن ارتعاشات بدست آمده را ضبط کرده و در نهایت یک نمودار رسم می‌شود. مشابه نموداری که در شکل ۳ آورده شده است. در هنگام اسکن کردن قطعات نباید سرعت انجام اسکن و ایجاد تغییرات در میزان فرکانس و پیره کردن زیاد باشد، چرا که در صورت زیاد بودن سرعت اسکن قطعه، احتمال وجود دارد که پیک‌های هارمونیک مورد نظر به خوبی رسم نشده و یا حتی دیده نیز نشوند. چرا که زمان مورد نیاز به قطعه داده نشده است تا دامنه‌ی نهایی و پیره‌های ایجاد شده را نشان دهد. اسکنی با سرعت حدود 10 RPM/S انجام شود، تقریباً برای همه مواد مورد استفاده قرار گرفته، پاسخگوی نیازها بوده است. در مواردی که قطعه مورد نظر بزرگ باشد باید با سرعت‌های کمتری اسکن کردن را انجام داد تا به بهترین و دقیق‌ترین نتیجه دست یافت. شکل ۳ تاثیر سرعت اسکن کردن قطعه را بر روی ایجاد پیک‌های هارمونیک قطعات نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش بی دلیل سرعت اسکن کردن، زمانی برای ایجاد و تشکیل پیک‌های مشخصه هارمونیک وجود نخواهد داشت [۲۵].



شکل ۳. این شکل نشان دهنده تغییرات ایجاد شده در نمودار دامنه-فرکانس بر اساس تغییر در سرعت اسکن کردن قطعه می‌باشد [۲۵].

با توجه به نمودار بالا سوال ایجاد می‌شود که با چه فرکانسی باید قطعه تحت و پیره کردن قرار گیرد تا تنش زدایی به صورت مناسبی رخ دهد. در پاسخ به این سوال سه نظریه وجود دارد.

۱- برای تنش‌گیری ارتعاشی باید از فرکانس طبیعی قطعات، همان فرکانسی که منجر به ایجاد بیشترین دامنه ارتعاشات در قطعات می‌شود، استفاده کرد. در اثر استفاده از این روش با اعمال انرژی بسیار کم، ارتعاشات با دامنه زیادی در قطعه ایجاد شده و در نتیجه این رخداد سیستم می‌تواند تنش زدایی شود. طبق این نظریه فرآیندها و دستگاه‌های مختلفی برای تنش‌گیری ارتعاشی ایجاد شده‌اند که شرکت‌های مختلفی از آنها استفاده می‌کنند [۶].

۲- این نظریه بیان می‌کند که برای تنش‌زدایی ارتعاشی قطعات، بحث دامنه ارتعاشات ایجاد شده در قطعه اهمیت ندارد، بلکه بحث فرکانس و پیره‌ها مورد اهمیت است [۲۵]. این نظریه که جدیدترین نظریه در بحث تنش‌گیری ارتعاشی است بیان می‌کند که برای تنش‌گیری ارتعاشی قطعات، نه از فرکانس طبیعی آنها بلکه باید از فرکانسی استفاده کرد که به مقدار کمی، کمتر از فرکانس طبیعی قطعات باشد. اصطلاحاً این فرکانس را هارمونیک تابع می‌نامند. این مورد اخیر تحت سرمایه‌گذاری انجمن انرژی آمریکا و توسط شرکت بونال، منجر به تولید روش جدیدی در صنعت تنش‌گیری ارتعاشی به نام متالاکس^۷ شده است [۲۷].

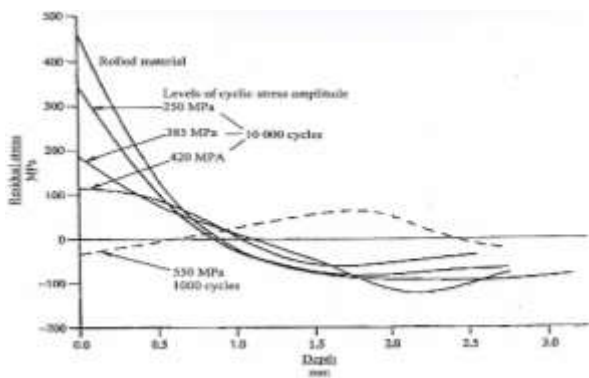
۳- بسیاری از محققین اعتقاد دارند که مهمترین عامل تاثیرگذار بر کیفیت عملیات تنش‌گیری ارتعاشی، دامنه ارتعاشات ایجاد شده در قطعات می‌باشد. این گروه معتقدند برای اینکه تنش زدایی به صورت قابل قبولی انجام شود باید دامنه ارتعاشات ایجاد شده به یک حداقل میزانی برسد و در مقادیر کمتر از آن دیگر تنش‌گیری رخ نخواهد داد، چرا که

۵-۱. تاثیر افزایش دامنه ارتعاشات بر کاهش

تنش‌های باقیمانده

با افزایش میزان دامنه ارتعاشات ایجاد شده در قطعات و همچنین افزایش فرکانس سیکل‌های بارگذاری، میزان تنش باقیمانده در قطعات کاهش یافته و عمقی از قطعه که تنش زدایی می‌شود نیز افزایش می‌یابد. این مورد در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است.

دقت شود که در این شکل بجای دامنه ارتعاشی که واحد آن از جنس m, mm و ... است از مقدار تنشی که برای ایجاد آن دامنه، توسط دستگاه ارتعاش ساز به قطعه مورد نظر وارد می‌شود (برحسب MPa)، استفاده شده است. هرچه میزان این تنش‌های اعمالی به قطعه بیشتر باشد، دامنه تنشی بیشتری به قطعه اعمال می‌گردد. با افزایش میزان دامنه ارتعاشات دیده می‌شود که عمق نفوذ تنش‌زدایی نیز افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن شکل ۴ دیده می‌شود که با افزایش دامنه ارتعاشات و رسیدن آن به ۵۵۰ مگاپاسکال تنش‌های باقیمانده به حد چشمگیری کاهش می‌یابند، اما باید در نظر گرفته شود که حجم زیادی تغییر شکل پلاستیک در اثر استفاده از این دامنه‌های بزرگ ارتعاشی رخ می‌دهد که می‌تواند تاثیر منفی بر عمر خستگی قطعات داشته باشد.



شکل ۴. نشان دهنده تغییر در میزان تنش‌های باقیمانده در قطعات نسبت به تغییر در دامنه ارتعاشات [۲۸].

بطور کلی انتظار داریم که با افزایش میزان دامنه تنشی، که در واقع همان تنش‌های خارجی وارده بر قطعه می‌باشند،

در طی انجام تنش‌گیری ارتعاشی باید حتما مقداری کرنش‌های میکرو در قطعه ایجاد شود تا بر اساس آزاد سازی پلاستیکی، تنش‌های باقیمانده در قطعات آزاد گردند.

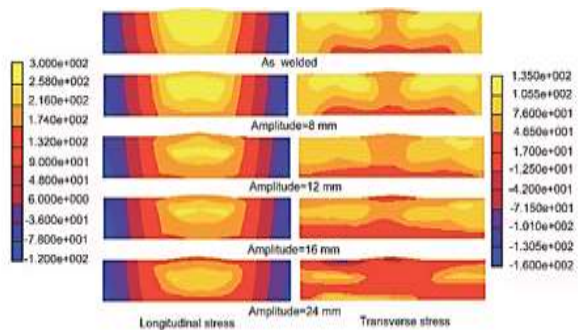
اما به چه دلیل در اثر ویبره کردن قطعات تنش‌های داخلی آنها کاهش می‌یابند؟ دو نظریه در مورد بحث حذف تنش‌های باقیمانده با استفاده از تنش‌گیری ارتعاشی (ویبره کردن قطعات) وجود دارد. اولین نظریه، که به نظریه استاندارد هم شناخته می‌شود، در واقع بیانگر این است که تنش‌های باقیمانده در قطعات با تنش‌های اعمال شده در اثر ارتعاش تجهیز جمع شده و با یکدیگر از حد تنش تسلیم گذشته و سبب ایجاد تغییر شکل‌های میکروسکوپی در قطعه می‌شوند. در نتیجه به سبب این تغییر شکل میکروسکوپی ایجاد شده در ساختار، تنش باقیمانده در قطعه کاهش چشمگیری می‌یابد (در واقع توزیع دوباره اتم‌ها در این حالت سبب ذخیره شدن تنش در قطعه نمی‌شود). البته این تئوری مشکلاتی هم دارد. یکی اینکه این تئوری بیان می‌کند که به محض رسیدن دامنه تنشی به حد مشخصی، باید تغییری در وضعیت تنش‌های باقیمانده موجود در قطعات رخ دهد که البته چنین چیزی مشاهده نشده است. نظریه دوم مبنا را بر حرکت نابجایی‌ها گذاشته شده است. این نظریه بیان می‌کند که در اثر ویبره کردن قطعات و ایجاد ارتعاشات در آنها، نابجایی‌هایی که با برخورد به موانع کوچکی قفل شده‌اند قابلیت حرکتی دوباره پیدا کرده و به مناطق جدیدی مهاجرت می‌کنند که دارای سطوح انرژی کمتری باشند و در نتیجه این عمل قطعات تنش زدایی می‌شوند. این مورد نیز نشان می‌دهد که عامل اصلی کاهش در میزان تنش‌های باقیمانده توسط ویبره کردن، ایجاد تغییر شکل‌های میکروپلاستیکی در قطعات بر اساس ایجاد ارتعاش در آنها می‌باشد. البته این نظریه هم دارای ابهامات زیادی است. بطور کلی می‌توان گفت که بحث تاثیر ویبره کردن تجهیز بر روی ساختار و نحوه کاهش تنش‌های باقیمانده آن، هنوز بعد از گذشت حدود ۶۰-۷۰ سال در حاله‌ای از ابهام می‌باشد.

تنش‌های باقیمانده موجود در قطعه با توجه به رابطه زیر کاهش یابند.

تنش باقیمانده در قطعات + تنش اعمالی به قطعات > تنش تسلیم قطعات

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرچه تنش خارجی اعمال شده بیشتر باشد، در هنگام حذف تنش‌ها، میزان کمتری تنش باقیمانده در قطعه باقی می‌ماند. با توجه به این مدل انتظار داریم که در چند سیکل اولیه میزان تنش‌های باقیمانده در قطعات بیشترین تغییر را از خود نشان دهد (که البته میزان این تغییرات و حدود این سیکل‌ها خود تابعی از میزان دامنه تنش اعمال شده می‌باشد). این نظریه البته در حالاتی دیده می‌شود که میزان دامنه تنش اعمال شده به قطعات در حد و اندازه‌های تنش تسلیم ماده مورد نظر باشد و در مورد دامنه‌های تنش کوچکتر پاسخگو نمی‌باشد.

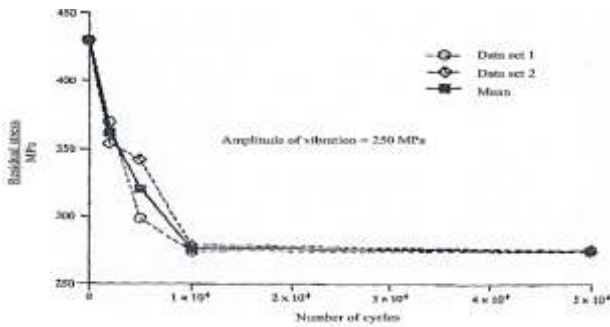
اثبات دیگری بر تاثیر افزایش دامنه ارتعاشی بر کاهش میزان تنش‌های باقیمانده در شکل ۵ آورده شده است. این شکل در واقع شبیه سازی شده تاثیر ویریه کردن قطعات بر میزان تنش‌های باقیمانده است که با کد مارک^۱ با استفاده از تکنیک اجزای محدود انجام شده است. در شکل ۵ نیز دیده می‌شود که با افزایش دامنه ارتعاشی قطعات، تنش‌های باقیمانده چه عرضی و چه طولی کاهش می‌یابند. مشاهده می‌گردد که با افزایش میزان دامنه ارتعاشی به ۲۴ میلیمتر، تنش‌های عرضی موجود در گوشه‌های جوش از حالت کششی به حالت فشاری نیز تبدیل شده‌اند [۱۷،۲۹].



شکل ۵. تاثیر افزایش دامنه ارتعاش قطعات بر کاهش تنش‌های

باقیمانده در آن [۲۹].

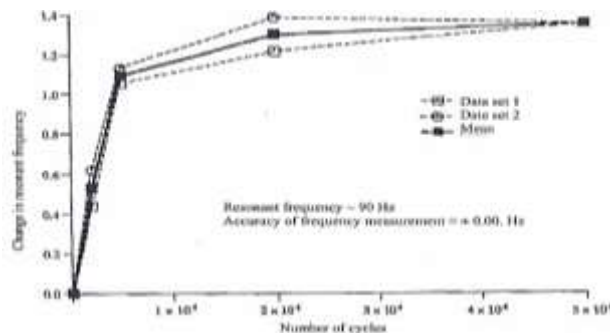
شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشترین میزان تغییر در میزان تنش‌های باقیمانده در قطعات در سیکل‌های اولیه رخ می‌دهد. البته این میزان برای دامنه‌های ارتعاشی مختلف متفاوت می‌باشد. بطور مثال در شکل ۶، که دارای دامنه ارتعاشی ۲۵۰ مگاپاسکال است، تغییر محسوس در میزان تنش‌های باقیمانده در حدود ۱۰۰۰۰ سیکل ایجاد شده است.



شکل ۶. نشان دهنده تغییر در تنش باقیمانده قطعات در مقابل

تعداد سیکل‌های ویریه کردن [۲۸].

علاوه بر موارد گفته شده دیده می‌شود که با افزایش زمان فرآیند تنش‌گیری (تعداد سیکل‌های ویریه کردن) تغییراتی در میزان فرکانس طبیعی قطعات یا همان فرکانس رزونانس رخ می‌دهد و فرکانس طبیعی قطعات در اثر انجام این عمل تنش‌زدایی، کاهش می‌یابد [۳۱،۳۰]. شکل ۷ نشان دهنده تغییرات فرکانس طبیعی قطعات در برابر تعداد سیکل‌های ویریه کردن است. مشاهده می‌شود که بیشترین مقادیر تغییرات در فرکانس طبیعی قطعات در اولین سیکل‌های اعمال شده می‌باشد، که این حد هم‌بستگی به سایز، وزن، نوع آلیاژ و دامنه ارتعاشات بستگی دارد.

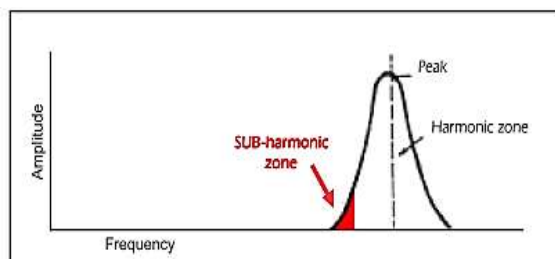


شکل ۷. نشان دهنده تغییر در میزان فرکانس طبیعی قطعات با توجه به افزایش سیکل‌های ارتعاشی [۲۸].

شکل ۸. نشان دهنده مناطق هارمونیک و Sub-Harmonic در نمودار فرکانس-دامنه [۳۰].

با توجه به توضیحاتی که در بالا آمده است، عدم درک صحیح از تاثیر ويبره کردن بر قطعات، می‌توان گفت که مرغوبیت انجام این فرآیند تنش‌زدایی تا حد زیادی وابسته به تجربیات شخص و اپراتور تنش‌گیری است. با توجه به این نکته می‌توان بیان کرد که امکان زیادی دارد تا ويبره کردن قطعات به حد قابل ملاحظه‌ای کمتر و یا بیشتر از حد مورد نیاز قطعه انجام شود. هر کدام از این موارد البته تبعاتی را در پی دارند. از یک طرف بحث ثبات ابعادی به حد مورد انتظار نمی‌رسد، چرا که تنش‌های موجود کاملاً حذف نشده‌اند، و از طرف دیگر بحث کاهش عمر قطعات از طریق کاهش مقاومت به خستگی را خواهیم داشت، چرا که ایجاد تغییر شکل پلاستیک زیادی را در اثر ويبره کردن زیاد با دامنه‌های ارتعاشی بالا خواهیم داشت.

مشکلات ذکر شده در بالا را با استفاده از روش تنش‌گیری ارتعاشی متالاکس می‌توان حذف کرد. در این روش همانطور که گفته شده است نه از فرکانس‌های هارمونیک بلکه از فرکانس‌هایی، کمتر از هارمونیک استفاده می‌شود. فرکانس مورد استفاده در این فرآیند در شکل ۸ به نمایش گذاشته شده است. در نتیجه‌ی استفاده از این دامنه‌های ارتعاشی، احتمال اینکه تغییر شکل‌های میکروسکوپی زیادی در قطعات ایجاد شوند به طور محسوس کاهش می‌یابد و در نتیجه این مورد مقاومت به خستگی قطعات نه تنها کاهش نمی‌یابد بلکه در اثر حذف تنش‌های باقیمانده افزایش نیز خواهند یافت.

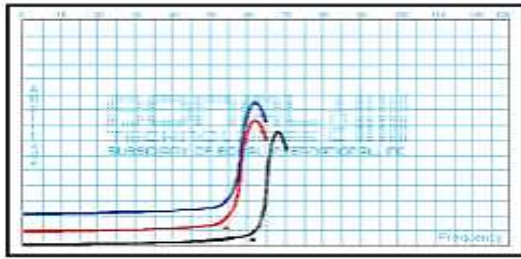


مشکل دیگر موجود در تنش‌گیری ارتعاشی، عدم قطعیت در زمان اتمام فرآیند تنش‌گیری، نیز با استفاده از روش متالاکس کاملاً قابل حل می‌باشد. برای توضیح دادن این روش ابتدا باید یاد آوری کرد که فرکانس هارمونیک ارتعاشات، در قطعه‌ای که دارای تنش باقیمانده است و قطعه‌ای که فاقد تنش باقیمانده است متفاوت می‌باشد. از همین خاصیت ذاتی مواد در روش متالاکس استفاده می‌شود تا زمان دقیق اتمام فرآیند تنش‌گیری محاسبه شود. نه مقداری بیشتر و نه مقداری کمتر [۲۹] اما چگونه؟

لازم به یادآوری است که در اثر وجود تنش‌های باقیمانده در قطعات، فرکانس طبیعی آنها افزایش می‌یابد که این موضوع با توجه به تحقیقات و تجربیات در شرکت‌های سازنده دستگاه‌های تنش‌گیری ارتعاشی [۳۰ ، ۲۳] همینطور محققین به اثبات رسیده است [۳].

۵-۲. روش تعیین زمان اتمام فرآیند تنش‌گیری ارتعاشی در متالاکس

در این روش نیز مانند روش‌های دیگر تنش‌گیری ارتعاشی قبل از اعمال ويبره‌های اصلی به قطعه یک مرتبه قطعه اسکن می‌شود تا نمودار فرکانس-دامنه قطعه بدست آید و با کمک آن بتوان فرکانس مورد نیاز برای تنش‌گیری قطعه را تنظیم کرد. شکل ۹ این مرحله را به نمایش گذاشته است. پس از انتخاب فرکانس هارمونی تابع به عنوان فرکانس لرزاننده قطعه، قطعه ويبره شده و بعد از گذشت مدت زمانی که وابسته به جنس، ابعاد و وزن قطعه است یک بار دیگر قطعه اسکن می‌شود. نمودار اسکن دوم در شکل ۱۰ آورده شده است. حال با توجه به منحنی جدید بدست آمده در فضای فرکانس - دامنه ارتعاش، فرکانس ويبره کردن جدید



شکل ۱۱. نشان دهنده عدم تغییر در فرکانس هارمونیک با طولانی تر شدن زمان و در نتیجه اتمام فرآیند تنش گیری [۳۱].

در مورد روش Meta-Lax ادعا می‌شود که این روش، تنها روشی است که می‌تواند یکنواختی کامل در فرآیند تنش‌زدایی قطعه ایجاد کند و مناسب‌ترین جایگزین برای روش تنش‌گیری حرارتی می‌باشد [۳۱].

۳-۵. مقایسه استفاده از فرکانس‌های هارمونیک و هارمونیک تابع بر روی تنش‌های باقیمانده در قطعات

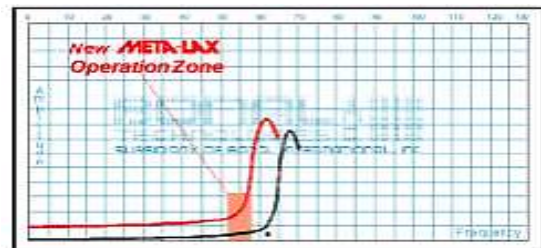
تاثیر استفاده از فرکانس‌های هارمونیک یا کمتر از آن بر روی تنش‌های باقیمانده در قطعات در شکل ۱۲ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که استفاده از فرکانس‌های هارمونیک تابع تاثیر بهتری بر حذف تنش‌های داخلی قطعات نسبت به فرکانس هارمونیک دارند. بطور کلی می‌توان گفت که میزان کاهش تنش‌های پسماند در قطعات به موارد ۴ گانه زیر مربوط می‌باشد.

- ۱- اندازه اولیه و گرادیان تنش پسماند در قطعه، ۲- دامنه تنش‌های دینامیک و ارتعاشات وارد شده به قطعه،
- ۳- تعداد سیکل‌های اعمالی، ۴- خواص ماده‌ای که تحت تنش‌زدایی ارتعاشی قرار می‌گیرد.

قطعه انتخاب شده و قطعه تحت آن ویبره می‌شود. گفتنی است که تغییر مکان نمودار از ۱ به ۲ بیانگر این نکته است که قطعه حداقل تا حدودی تنش‌زدایی شده است.

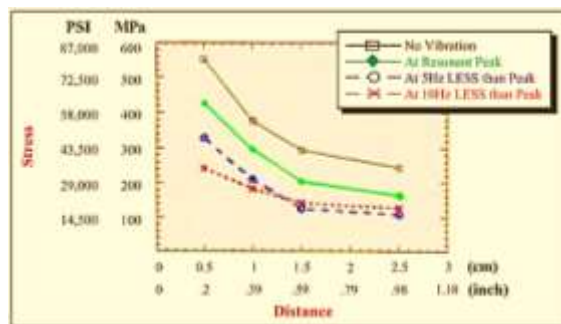


شکل ۹. نشان دهنده نمودار فرکانس - دامنه و منطقه مورد استفاده در فرآیند تنش‌گیری Meta-Lax [۳۱].



شکل ۱۰. نشان دهنده نمودار فرکانس - دامنه قطعه که در مرحله دوم و بعد از ویبره کردن قطعه بدست آمده است [۳۱].

بعد از ویبره کردن قطعه تحت فرکانس جدید نیز دوباره فرآیند اسکن شدن قطعه انجام می‌شود. چنانچه نمودار جدید و نمودار دوم نشان دهنده فرکانس هارمونیک یکسانی باشند، می‌توان دقیقاً گفت که عملیات تنش‌گیری به اتمام رسیده است. زیرا همانطور که قبلاً هم ذکر شد، در اثر حذف تنش‌های باقیمانده در قطعات فرکانس هارمونیک قطعه تغییر می‌کند. در نتیجه عدم تغییر در میزان این فرکانس نشان دهنده این است که قطعه به طور کامل تنش‌زدایی شده است. این قضیه در شکل ۱۱ آورده شده است. در نمودار مشاهده می‌شود که منحنی آبی و قرمز دارای فرکانس هارمونیک یکسانی هستند. این زمان، زمانی است که قطعه عملیات تنش‌زدایی به اتمام رسیده است.



شکل ۱۲. نشان دهنده تاثیر استفاده از فرکانس های هارمونیک تابع و هارمونیک بر کاهش تنش های داخلی قطعات.

روش تنش گیری حرارتی را در مورد قطعات ماشین سازی نمی توان به عنوان آخرین مرحله کاری در نظر گرفت، زیرا بعد از انجام این عملیات بنابر توضیحات داده شده در قبل، نیاز به فرآیندهای دیگری مانند ماشینکاری یا سندبلاست می باشد. اما روش تنش گیری ارتعاشی این قابلیت را دارد که در آخرین مرحله از فرآیند تولید انجام شود، چرا که تغییرات ابعادی ایجاد نشده و خواص قطعه تغییر نخواهد کرد.

۵-۶. حل مشکل آلودگی محیط زیست

بدلیل عدم استفاده از سوخت های فسیلی در فرآیند تنش گیری ارتعاشی، دیگر آلودگی زیست محیطی وجود نخواهد داشت. و مصرف انرژی در این روش بسیار کمتر از روش حرارتی است.

۶-۶. حل مشکل تغییر در خواص مکانیکی مواد

در روش تنش گیری ارتعاشی بدلیل اینکه هیچگونه حرارتی به قطعه وارد نمی شود، هیچگونه تغییر مضر در خواص مکانیکی مواد مشاهده نخواهد شد و چنانچه تغییری دیده شود منجر به افزایش خواص ماده می باشد. چرا که در اثر حذف تنش های باقیمانده خواص مکانیکی مواد بهبود می یابد [۳۴]. (البته این در موری است که از دامنه های ارتعاشی خیلی بزرگی استفاده نشود. چرا که در این حالت مقاومت به خستگی ماده می تواند کاهش یابد).

۷-۶. حل مشکل وجود محدودیت ابعادی

در روش تنش گیری حرارتی همانطور که اشاره شد بسته به سایز کوره و دمایی که قابلیت رسیدن به آن را دارد، محدودیت هایی برای عملیات تنش گیری اعمال می شود. اما در روش تنش گیری ارتعاشی هیچگونه محدودیتی از لحاظ ابعاد و وزن برای قطعات وجود ندارد. قطعاتی از چند کیلوگرم تا چندین صد تن را با این روش می توان تنش زدایی کرد.

۶-۶. مقایسه روش تنش گیری حرارتی و تنش گیری ارتعاشی^۹ و حل مشکلات ناشی از تی. اس. آر.

۱-۶. کاهش مشکل هزینه زیاد عملیات تنش گیری می توان گفت که هزینه انجام عملیات تنش گیری ارتعاشی حدود ۹۰-۹۵ درصد کمتر از تنش گیری حرارتی است.

۲-۶. کاهش در زمان عملیات تنش گیری

روش متالاکس در نهایت بین ۳۰ دقیقه تا ۲ ساعت زمان نیاز دارد تا قطعه را کاملا تنش زدایی کند. این نکته بدین معنی است که عملیات تنش گیری ارتعاشی بین ۸-۴۸ برابر زودتر از تنش گیری حرارتی قابلیت انجام شدن دارد. مدت زمان مورد نیاز برای انجام تنش گیری ارتعاشی بسته به وزن، سایز و مقدار تنش موجود در قطعه می باشد و بندرت برای قطعات خیلی بزرگ به بیشتر از ۲ ساعت خواهد رسید.

۳-۶. کاهش و حذف اعوجاج ناشی از تنش گیری حرارتی

بدلیل عدم وجود حرارت در روش تنش گیری ارتعاشی دیگر تغییرات اعوجاجی ناشی از عملیات تنش گیری در قطعات دیده نمی شود [۳۲، ۳۳].

۴-۶. زمان انجام عملیات تنش گیری در فرآیند تولید

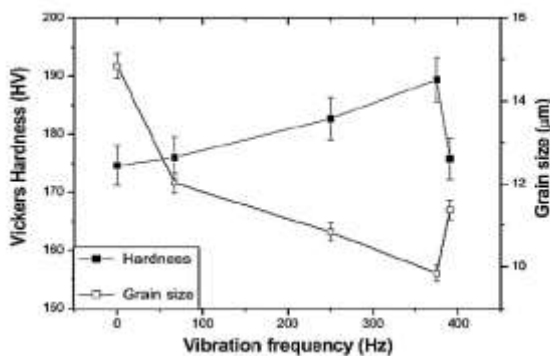
۶-۸. حل مشکل عدم امکان تنش‌گیری حرارتی

برای تمامی آلیاژها

بنا بر ذات تنش‌گیری حرارتی، چنانچه در بالاتر ذکر شده است، این روش قابلیت انجام برای تمامی مواد را ندارد. درمقابل روش تنش‌گیری ارتعاشی را تقریباً برای تمام مواد

جدول ۱. آلیاژهایی که به طور موفقیت آمیز به روش Meta-Lax استفاده شده‌اند.

خانواده های آلیاژی	مواد مورد مطالعه قرار گرفته
1020, A36, 4620, 8620	فولادهای کم کربن
1045, 1060, 4140(Mo40), 4340(VCN200), H13, P20	فولادهای کربن متوسط
A2, D2, M1, M2, M3, S7, HU80, HY100	فولاد ابزار
356, 2000's, 5000's, 6000's, 7000's	آلومینیوم
304, 316, 410, 416, 420	فولادهای زنگ نزن
چدن خاکستری، چدن نشکن و...	چدن
تیتانیوم، اینکونل، منیزیم، طلا	دیگر آلیاژها



شکل ۱۳. تاثیر افزایش فرکانس ویریه کردن جوش ایجاد شده بر روی فلز ۳۰۴ [۲۶].

۶-۱۰. امکان انجام عملیات در سایت

بدلیل قابل حمل بودن تجهیزات تنش‌گیری ارتعاشی، می‌توان این فرآیند تنش‌گیری را در سایت تولید و یا مونتاژ قطعات و تجهیزات انجام داد. این مورد از لحاظ کاهش هزینه بسیار موثر می‌باشد.

۷. نتیجه گیری

تنش‌گیری ارتعاشی را به عنوان یک فرآیند اصلاح کننده درحین انجام جوشکاری هم می‌توان انجام داد. درصورت استفاده از این سیستم خواص جوش افزایش پیدا کرده و مقاومت فلز جوش در برابر ایجاد ترک به میزان ۷۵-۴۰۰ درصد افزایش می‌یابد. این درحالی است که تنش‌گیری حرارتی لزوماً عملیاتی است که منجر به حذف تنش‌های باقیمانده در ساختار می‌شود و مانند تنش‌گیری ارتعاشی قابلیت انجام در حین فرآیند را ندارد. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس ویریه کردن جوش حاصل از فرآیند تی. آی. جی^{۱۰} بر روی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ دانه‌ها ریزتر شده و سختی افزایش می‌یابد [۷، ۳۵].

۶-۹. تقسیم بندی هزینه‌ها

هزینه استفاده از روش تنش‌گیری ارتعاشی برابر با هزینه یک نفر ساعت کار مداوم و انرژی مصرفی یک ساعت به اندازه یک قهوه جوش می‌باشد. در مقابل هزینه‌های تنش‌گیری حرارتی شامل عملیات تنش‌گیری، حمل بار، سوخت و... می‌باشد.

۴- تنش‌گیری ارتعاشی بدلیل حذف معایب روش تنش‌گیری حرارتی (زمان کوتاه تر، عدم نیاز به تمیزکاری بعد عملیات تنش‌گیری و....) صرفه اقتصادی بیشتری را به دنبال دارد.

۵- برای مشخص کردن کافی بودن زمان تنش‌گیری ارتعاشی از آزمون مودال و پیدا کردن فرکانس طبیعی مواد استفاده می‌شود. اگر بعد از انجام دو مرحله تنش‌گیری ارتعاشی دیگر فرکانس طبیعی قطعات تغییر نکرد، بدین معنی است که فرآیند تنش‌گیری به اتمام رسیده است.

در میان روش‌های تنش‌گیری ارتعاشی استفاده از روش فرکانس‌های کمتر از فرکانس طبیعی (هامونیک تابع) کارایی بیشتری دارد.

پس از بررسی اطلاعات بدست آمده از نتایج کارهای محققین و شرکت‌های فعال در زمینه تنش‌گیری قطعات، به نتایج زیر دست یافتیم:

- ۱- تنش‌گیری ارتعاشی می‌تواند مانند تنش‌گیری حرارتی در کاهش میزان تنش‌های باقیمانده قطعات موثر باشد.
- ۲- چنانچه در انجام عملیات تنش‌گیری تغییر در ساختار هم اهمیت داشته باشد تنش‌گیری حرارتی مناسب‌تر است.
- ۳- تنش‌گیری ارتعاشی می‌تواند سبب افزایش عمرکاری قطعات و بهبود خواص مکانیکی قطعات شود.

۸. مأخذ

- [1] Budynas, Richard G., Keith J. Nishbeth, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10th Edition: McGraw-Hill, 2015.
- [2] Hahn, William F., "Vibratory Residual Stress Relief and Modification Sin Metals to Conserve Resources and Prevent Pollution", *Center of Environmental and Energy Research (CEER)* 2002.
- [۳] فرهی، غلامحسین، محمد چمنی، "بررسی تاثیر فرآیند تنش زدایی ارتعاشی بر کاهش تنش پسماند در جوش"، *دوازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، تهران، انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.*
- [4] Malaki, Massoud, Hongtao Ding, "A review of ultrasonic peening treatment", *Materials and Design* 87, 2015, pp.1072-1086.
- [۵]. غیور، مصطفی، مهدی جعفری، "تحلیل حذف تنش‌های ایجاد شده توسط فرآیندهای ماشینکاری یا جوشکاری به کمک روش‌های ارتعاشی"، *دوازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، تهران، انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.*
- [6] Weiss, S., G. S. Baker, R. D. Gupta, "Vibrational Residual Stress Relief in a Plain Carbon Steel Weldment", *Americal Welding Socity*, 1976.
- [7] Hiseh, Chih-Chuh, Chien-hong Lai., Weite Wu., "Effect of vibration on microstructures and mechanical properties of 304 stainless steel GTA welds", *Metals and Materials International*, Vol.19, 2013, pp. 835-844.
- [8] Wang, Jan-Siang, Chih-chun Hsieh, Chi-Ming Lin., Che-Wei Kuo, Weite Wu, "Texture evolution and residual stress relaxation in a cold-rolled Al-Mg-Si-Cu alloy using vibratory stress relief technique", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.44, 2013, pp.806-818.
- [9] Shalvandi, M., Y. Hojjat, A. Abdullah, H. Asad, "Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief", *Materials & Design*, Vol.46, 2013, pp.713-723.
- [10] Roa, D., D. Wang, L. Chen, C. Ni, "The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress", *Internationl Journal of fatigue*, Vol.29, 2007, pp.192-196.

[۱۱] پورصفر، امین، حامد برقی کار، عباس امرالهی، احمدرضا شرقی، "بررسی تاثیر تنش زدایی به روش ارتعاشی بر روی نیروهای ماشینکاری در فولادهای ساختمانی St37-2 مورد استفاده در سازه های فولادی"، دوازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، تهران، انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.

[12] Masubuchi, K., D. W. Hopkins, "Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and Their Consequences", Pergamon Press, 1980.

[۱۳] مجدینیا. فرهمند، "عملیات حرارتی جوشکاری"، انتشارات فرهمند، ۱۳۸۵.

[۱۴] سیف الهی، م، سیف الهی، ج، سروری، ص، ن. حاجی زاده نیازی، "دستورالعمل اجرایی تنش گیری ارتعاشی قطعات صنعتی"، همایش پژوهش های کاربردی در علوم مهندسی، ۱۳۹۲

[۱۵] گلغدار، م. ع، "عملیات حرارتی فولادها"، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۱۶] کوکبی، ا. ح، ب. بیدختی، "تکنولوژی جوشکاری"، انتشارات دانشگاه شریف، جلد دوم متالورژی جوشکاری، ۱۳۹۳

[17] Yang. Y, "Understanding of vibration stress relief with computation modeling", *Materials Engineering and Performance*, Vol.18, 2009, pp.856-862.

[18] Hebel. T., "3 Major problems with thermal stress relief and how to overcome them", Bonal Technologies, Inc., 2008.

[19] "AWS D1.1 Structural Welding Code", 21th Edition, American Welding Society, 2008.

[20] Dawson, R., D. G. Moffat. "Vibratory stress relief: A fundamental study of its effectiveness", *Eng. Mater. Technol* Vol.102 No.2, 1980, pp.169-176.

[21] Jalil, A., Aswan, N., Talib, A., Rahim, A. and Hussein, A.R, "Improvement of mechanical welding properties by using induced harmonic vibration", *Journal of applied science*, Vol.11, 2011, pp.348-353.

[22] "A Comittee, Code for boilers and pressure Vessles", *chapter 8: American Society of Mechanical Engineering*, 2011.

[۲۳] لیپولد، ج، دامیان کوتکی، "متالورژی جوشکاری و جوش پذیری فولادهای زنگ نزن"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۹۱.

[24] Jafari Mehrabadi, S., M. Azizmoradi, M. M. Emami, "Stress relief and material properties improvement through vibration vs. common thermal method", *Journal of Solid Mechanics*, Vol.4, 2012, pp.170-176.

[25] "Vibration Stress. Relief". [Online Wikipedia].

[26] Hebel. G, "Vibrational conditioning of metals", *Heat Treating Progress Magazine*, 2004.

[27] "The Future of Stress Relief is", Bonal Technologies, Inc., 2008.

[28] Walker, C.A., A. J. Waddell, and D. J. Johnston, "Vibratory stress relief—an investigation of the underlying processes". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol.209, No.1, 1995, pp.51-58.

[29] Zhao, X.C, Y. D. Zhang, H. W. Zhang, Q. Wu. "Simulation of vibration stress relief after welding based on FEM", *Acta Metallurgica Sinica* Vol.21, 2008, pp.289-294.

[30] "Summery of Research data using Meta-Lax technology", Bonal Technologies, Inc., 1998.

[31] "Sress Relief Confidence", Bonal Technologies, Inc., 2012.

[32] "Customer's opinion about using Meta-Lax", www.Meta-Lax.com, Meta-Lax. [Online].

[33] "Meta-Lax for Heat Treaters", Bonal Technologies, Inc., 2001.

[۳۴] عزیز مرادی، م، س. جعفری مهر آبادی، ع. نبی زاده، "تنش گیری و بهبود خواص مکانیکی به وسیله ارتعاشات در جوشکاری فولاد معمولی به فولاد زنگ نزن"، دومین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات، سال ۱۳۹۱.

[۳۵] حنایی، س.، م. ماموریان. ح. چترسفید، "کاربرد روش حداقل سازی تولید آنتروپی در کارسختی قطعات جوشکاری شده"، همایش ملی مهندسی مکانیک، ۲۰۱۲.

[36] "*Meta-Lax for Welding*", Bonal Technologies, Inc., 2000.

[37] "*Meta-Lax for Racing Industry*", Bonal Technologies, Inc., 2000.

[38] McGoldrick. R.T, Harlod.E Saunders, "Experiments in stress relieving castings and welded structures by vibration", *The American Society for Naval Engineers*, Vol.55, 1943 pp. 589-609.

[39] Sun. M.C, Y.H. Sun, R. K. Wang, "Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel", *Materials Letters*, Vol.58, 2004, pp.1396-1399.

پی نوشت

1. Hahn
2. Bonal
3. TSR (Thermal Stress reliving)
4. Cryogenic
5. Sub-Harmonic
6. Harmonic or Resonance
7. Metal relaxation (mea lax)
8. MARC
9. Vibratory stress relieving
10. TIG (Tungsten Inert Gas)