

بررسی روش‌های نوین اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات نیروگاهی



مدیر پروژه: محمد چمنی
واحد مجری: گروه تجهیزات دوار مکانیکی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بررسی روش‌های نوین اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات نیروگاهی

مدیر پروژه:

محمد چمنی

گروه پژوهشی پشتیبان و واحد مجری:

گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

ب

کد ثبت گزارش: NRI-ER-864-PMEPN42-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.324

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی
بررسی روش‌های نوین اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات نیروگاهی / مدیر پروژه: محمد چمنی.
ویراستار: نازنین محمدی‌نام. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۲۱۲ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. چمنی محمد، همکار پروژه. ۲. توکلی، احسان، مدیر واحد مجری. ۳. گروه تجهیزات
دوار مکانیکی ۴. طراحی جامدات



انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر
مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب محمد چمنی، مدیر پروژه بررسی روش‌های نوین اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات نیروگاهی و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

□ گزارش حاصل انجام مرحله از مرحله پروژه است.

پیشگفتار

تنش پسماند بر اثر انجام فرآیندهای ساخت همانند جوشکاری، شکل‌دهی، ریخته‌گری و غیره در جسم باقی می‌ماند و در حالی که جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست وجود دارد. تنش‌های پسماند در اثر تغییرات شدید و غیر یکنواخت دما، اعمال بارهای مکانیکی فراتر از حد تسلیم و تغییر فاز مواد در سازه‌ها ایجاد می‌شود. علت اینکه شناسایی چنین تنش‌هایی مهم است این است که وقتی جسم تحت تنش خارجی قرار می‌گیرد، این تنش خارجی به تنش پسماند موجود افزوده می‌شود. علاوه بر تنش‌هایی که در اثر ساخت و به صورت نامطلوب در سازه ایجاد می‌شود، در برخی موارد جهت افزایش عمر سازه با ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح ماده عمر خستگی سازه را افزایش می‌دهند. برای نمونه می‌توان روش‌های شات پینینگ، لیزر پینینگ، آلتراسونیک پینینگ، اتوفرتاژ و غیره را نام برد. باید توجه داشت که تنش‌های پسماند در تعادل هستند و اعمال تنش فشاری بسیار زیاد می‌تواند سبب ایجاد مقادیر بالای تنش کششی در نواحی دیگر سازه گردد.

با توجه به اهمیت تنش‌های پسماند در افزایش یا کاهش عمر یک سازه، لازم است که این تنش‌ها با دقت بالایی در سازه‌های حساس اندازه‌گیری شوند. برای این منظور سه دسته‌بندی، روش‌های مخرب، روش‌های نیمه مخرب و روش‌های غیر مخرب جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند توسعه داده شده است. از روش‌های مخرب می‌توان روش کانتور و روش لایه‌برداری مکانیکی و لایه‌برداری شیمیایی را نام برد. روش‌های سوراخکاری عمیق، سوراخکاری رینگی و سوراخکاری مرکزی نمونه‌هایی از روش نیمه مخرب و روش‌های پراش اشعه ایکس، پراش نوترونی، نانوفوذ، پراش سنکروترون، امواج مغناطیسی و روش آلتراسونیک نیز جزو روش‌های غیر مخرب به شمار می‌روند. با توجه به حساسیت بالای قطعات مورد استفاده در نیروگاه‌ها، لازم است که از روش‌های نیمه مخرب و غیر مخرب برای یافتن مقادیر تنش پسماند استفاده کرد. همچنین دقت روش مورد استفاده در اندازه‌گیری مقادیر تنش پسماند بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مواردی از قبیل حداقل ضخامت مورد نیاز برای اندازه‌گیری تنش پسماند، تخریب ایجاد شده در اثر اندازه‌گیری تنش پسماند، دقت اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح، دقت اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق، پرتابل بودن یا پرتابل نبودن تجهیزات اندازه‌گیری ابزارهای اندازه‌گیری تنش پسماند، اندازه‌گیری تنش پسماند روی نمونه آزمایشگاهی مشابه و یا اندازه‌گیری روی خود سازه، قابلیت اطمینان داده‌های اندازه‌گیری شده، هزینه تمام شده برای انجام هر تست، هزینه اولیه مجموعه اندازه‌گیری تنش پسماند، محدوده عملکردی روش اندازه‌گیری تنش پسماند برای مواد مختلف، نیاز به مسطح بودن سطح اندازه‌گیری تنش پسماند، حدود بالا و پایین اندازه‌گیری تنش و امکان تامین و ساخت دستگاه اندازه‌گیری از جمله مواردی هستند که در انتخاب روش ارجح برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات نیروگاهی اهمیت بسیار زیادی دارند. با توجه به ابداع روش‌های جدید اندازه‌گیری تنش پسماند که عموماً در دسته روش‌های غیر مخرب گنجانده می‌شوند، رصد فناوری و مطالعه عملکرد این روش‌ها، جهت انتخاب روش ارجح برای اندازه‌گیری تنش پسماند امری حیاتی می‌باشد.

"این گزارش مربوط به مرحله نهایی از پروژه بررسی روش‌های نوین اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات نیروگاهی است که پشتیبانی آن، بر عهده گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی و داوری آن، بر عهده سرکار جناب آقای دکتر سید ابوالفضل موسوی ترشیزی بوده است."

فهرست مطالب

۲	۱- فصل اول: ماهیت تنش‌های پسماند
۳	۱-۱- مقدمه
۳	۱-۲- ماهیت تنش پسماند
۵	۱-۳- تأثیرات تنش پسماند
۷	۱-۴- گرا دیان تنش پسماند
۸	۲- فصل دوم: روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند
۹	۲-۱- مقدمه
۹	۲-۲- روش‌های کلی اندازه‌گیری تنش پسماند
۱۰	۲-۲-۱- روش‌های مبتنی بر آزادسازی تنش
۱۳	۲-۲-۲- روش‌های مبتنی بر پراش اشعه پراشگری
۱۴	۲-۲-۳- روش‌های دیگر
۱۵	۲-۳- روش سوراخکاری مرکزی
۱۵	۲-۳-۱- کلیات روش سوراخکاری مرکزی
۱۸	۲-۳-۲- تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی
۲۰	۲-۳-۳- تکنیک اندازه‌گیری نوری
۲۲	۲-۴- روش سوراخکاری عمیق
۲۵	۲-۵- روش Ring Core
۲۶	۲-۶- روش Sach's Boring
۲۸	۲-۷- روش Slitting
۳۰	۲-۸- روش کانتور
۳۳	۲-۹- روش پراش اشعه ایکس
۳۵	۲-۱۰- پراش سنکرون اشعه ایکس
۳۶	۲-۱۱- روش پراش نوترونی
۳۷	۲-۱۲- روش آلتراسونیک
۳۸	۲-۱۳- نانوفوذ
۳۹	۲-۱۴- فتوالاستیسیته
۳۹	۲-۱۵- روش مغناطیسی
۴۰	۲-۱۶- عملکرد و محدودیت‌های روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند

۴۰.....	۲-۱۷- استراتژی های تعیین روش اندازه گیری تنش پسماند.....
۴۴.....	۳- فصل سوم: روش های ایجاد تنش پسماند فشاری.....
۴۵.....	۳-۱- مقدمه.....
۴۵.....	۳-۲- روش ساچمه زنی.....
۵۰.....	۳-۳- لیزر پینینگ.....
۵۲.....	۳-۴- غلتک کاری.....
۵۳.....	۳-۵- روش Deep Cold Rolling.....
۵۵.....	۳-۶- روش Ultrasonic surface rolling process (USRP).....
۵۷.....	۳-۷- ساچمه زنی آلتراسونیک.....
۶۱.....	۳-۸- روش Low Plasticity Burnishing.....
۶۷.....	۳-۹- روش آلتراسونیک پینینگ.....
۶۷.....	۳-۹-۱- کلیات روش.....
۶۸.....	۳-۹-۲- تجهیزات روش آلتراسونیک پینینگ.....
۷۳.....	۳-۱۰- روش Cavitation Peening.....
۷۵.....	۳-۱۱- روش Rotary Flap Peening.....
۷۶.....	۴- فصل چهارم: روش های آسایش تنش پسماند.....
۷۷.....	۴-۱- مقدمه.....
۷۷.....	۴-۲- تنش زدایی حرارتی.....
۷۸.....	۴-۲-۱- مراحل سه گانه تنش زدایی حرارتی.....
۸۰.....	۴-۳- الزامات پیش گرم و دمای بین پاسی در جوشکاری.....
۸۰.....	۴-۳-۱- مقدمه.....
۸۱.....	۴-۳-۲- دمای بین پاسی در جوشکاری.....
۸۲.....	۴-۴- عملیات حرارتی پس از جوشکاری.....
۸۲.....	۴-۴-۱- مقدمه.....
۸۴.....	۴-۴-۲- عملیات حرارتی پس از جوشکاری طبق استاندارد ASME B31.3.....
۸۵.....	۴-۴-۳- عملیات حرارتی پس از جوشکاری طبق استاندارد ASME BPVC Section VIII, Division 1.....
۸۷.....	۴-۴-۴- الزامات PWHT در استاندارد AWS D1.1.....
۸۸.....	۴-۵- روش تنش زدایی ارتعاشی.....
۸۸.....	۴-۵-۱- مقدمه.....
۹۲.....	۴-۵-۲- اصول حاکم بر تنش زدایی ارتعاشی.....
۹۴.....	۴-۶- الزامات تنش زدایی ارتعاشی.....
۹۶.....	۴-۷- تحقیقات تجربی.....

۴-۸- تنش زدایی ارتعاشی در فرکانس رزونانس	۱۰۰
۴-۹- تنش زدایی در فرکانس کمتر از فرکانس تحریک	۱۰۵
۴-۱۰- امکان استفاده از دستگاه تنش زدایی ارتعاشی	۱۰۸
۴-۱۱- تجهیزات مورد نیاز برای ساخت دستگاه تنش زدایی ارتعاشی	۱۰۸
۵- فصل پنجم: مرور ادبیات تنش‌های پسماند در کاربرد نیروگاهی	۱۱۰
۵-۱- مقدمه	۱۱۱
۵-۲- توربین و کمپرسور	۱۱۱
۵-۳- تنش پسماند در بویلرها	۱۲۱
۵-۴- آسایش تنش پس از اعمال تنش پسماند فشاری	۱۲۷
۶- فصل ششم: روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند قابل توسعه در پژوهشگاه نیرو	۱۳۰
۶-۱- مقدمه	۱۳۱
۶-۲- روش کانتور	۱۳۱
۶-۲-۱- برش نمونه	۱۳۲
۶-۲-۲- اندازه‌گیری سطح نمونه	۱۳۵
۶-۲-۳- آنالیز داده‌ها	۱۳۶
۶-۲-۴- کاربردهای روش کانتور در اندازه‌گیری تنش پسماند	۱۴۰
۶-۳- روش سوراخکاری مرکزی	۱۴۶
۶-۳-۱- کلیات روش سوراخکاری مرکزی	۱۴۶
۶-۳-۲- الزامات استاندارد ASTM E837-08	۱۴۸
۶-۳-۳- تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی	۱۵۱
۶-۳-۴- منابع ایجاد خطا در روش سوراخکاری مرکزی	۱۵۳
۶-۴- روش مغناطیسی	۱۵۳
۶-۴-۱- حوزه‌های مغناطیسی	۱۵۴
۶-۴-۲- نویز Barkhausen	۱۵۸
۶-۴-۳- معرفی اجزای سیستم	۱۵۹
۶-۵- عمق اندازه‌گیری و دقت اندازه‌گیری	۱۶۱
۷- فصل هفتم: تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند در داخل و خارج از کشور	۱۶۲
۷-۱- مقدمه	۱۶۳
۷-۲- تجهیزات تجاری اندازه‌گیری تنش پسماند	۱۶۳
۷-۲-۱- دستگاه‌های پرتابل X-ray	۱۶۳
۷-۲-۲- دستگاه سوراخکاری مرکزی	۱۶۵
۷-۲-۳- دستگاه Ring-Core	۱۶۷
۷-۲-۴- دستگاه میدان مغناطیسی	۱۶۸

۱۶۸	۷-۳- امکانات اندازه‌گیری تنش پسماند در کشور
۱۶۹	۷-۳-۱- روش اشعه ایکس
۱۷۰	۷-۳-۲- سوراخکاری مرکزی
۱۷۱	۷-۳-۳- روش آلتراسونیک
۱۷۲	۷-۳-۴- روش Slitting
۱۷۳	۷-۳-۵- روش میدان مغناطیسی
۱۷۴	۸- فصل هشتم: تعیین روش‌های مناسب اعمال تنش پسماند، تنش‌زدایی و اندازه‌گیری تنش پسماند
۱۷۵	۸-۱- مقدمه
۱۷۵	۸-۲- روش‌های مناسب اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات نیروگاهی
۱۷۵	۸-۲-۱- روش سوراخکاری مرکزی
۱۷۹	۸-۲-۲- روش کانتور
۱۸۰	۸-۲-۳- پراش اشعه ایکس
۱۸۱	۸-۲-۴- روش‌های دیگر اندازه‌گیری تنش پسماند
۱۸۲	۸-۳- روش‌های اعمال تنش پسماند فشاری
۱۸۳	۹- فصل نهم: نتیجه‌گیری
۱۸۴	۹-۱- مقدمه
۱۸۴	۹-۲- موارد بررسی شده
۱۸۵	۹-۳- توسعه فناوری در کشور
۱۸۵	۹-۴- توسعه فناوری در پژوهشگاه نیرو
۱۸۷	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: حالات مختلف بارگذاری بر یک جسم [۱]..... ۳
- شکل ۱-۲: برخی از روش‌هایی که سبب ایجاد تنش پسماند می‌شوند [۱]..... ۴
- شکل ۱-۳: شکست در بیلت آلومینیوم ریخته‌گری به سبب تنش پسماند [۱]..... ۵
- شکل ۱-۴: اعوجاج ایجاد شده در سازه بخش بار یک هواپیما پس از انجام فرایند ماشین‌کاری [۱]..... ۶
- شکل ۱-۵: تأثیر تنش پسماند بر عملکرد مواد [۲]..... ۷
- شکل ۱-۶: گرادپان تنش در دو فرایند جوشکاری و ماشین‌کاری [۱]..... ۷
- شکل ۲-۱: دسته بندی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند از منظر تخریب ایجاد شده روی قطعه [۱]..... ۹
- شکل ۲-۲: دسته بندی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند از منظر عمق اندازه‌گیری تنش پسماند [۱]..... ۱۰
- شکل ۲-۳: روش splitting برای (a) میله و (b) لوله [۱]..... ۱۱
- شکل ۲-۴: روش مقطع زدن برای اندازه‌گیری تنش پسماند در یک ناحیه مشخص [۱]..... ۱۱
- شکل ۲-۵: روش لایه برداری (a) از یک سطح تخت و (b) از یک استوانه [۱]..... ۱۲
- شکل ۲-۶: روش‌های سوراخکاری (a) روش سوراخکاری مرکزی، (b) روش ring-core و (c) روش سوراخکاری عمیق [۱]..... ۱۲
- شکل ۲-۷: روش slitting برای اندازه‌گیری تنش پسماند [۱]..... ۱۳
- شکل ۲-۸: انعکاس تشعشعات داخل یک ساختار کریستالی [۱]..... ۱۴
- شکل ۲-۹: شماتیکی از جابجایی ایجاد شده در اثر سوراخکاری نمونه حاوی تنش پسماند [۱]..... ۱۵
- شکل ۲-۱۰: موقعیت کرنش‌سنج‌ها نسبت به سوراخ مرکزی [۳]..... ۱۶
- شکل ۲-۱۱: یک نمونه از کرنش اندازه‌گیری شده و تنش‌های پسماند به دست آمده از محاسبات [۳]..... ۱۷
- شکل ۲-۱۲: دو نمونه از دستگاه‌های ایجاد سوراخ در روش سوراخکاری مرکزی [۱]..... ۱۸
- شکل ۲-۱۳: مجموعه تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی..... ۱۸
- شکل ۲-۱۴: انواع مختلف کرنش‌سنج برای استفاده در سوراخکاری مرکزی [۱]..... ۱۹
- شکل ۲-۱۵: چپ: اتصال کرنش‌سنج به نمونه، وسط: اتصال سیم‌ها به کرنش‌سنج و راست: ایجاد سوراخ با دریل مخصوص [۱]..... ۱۹
- شکل ۲-۱۶: مته‌های استفاده شده برای ایجاد سوراخ در روش سوراخکاری مرکزی [۱]..... ۲۰
- شکل ۲-۱۷: الگوی ایجاد شده با استفاده از تصاویر دیجیتالی در اثر ایجاد سوراخ در نمونه [۱]..... ۲۰
- شکل ۲-۱۸: مراحل انجام روش سوراخکاری مرکزی [۵]..... ۲۲
- شکل ۲-۱۹: روش سوراخکاری عمیق برای جوش چند پاسه [۵]..... ۲۳
- شکل ۲-۲۰: نمونه دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند با روش سوراخکاری عمیق [۵]..... ۲۴
- شکل ۲-۲۱: نمایی از روش Ring Core برای اندازه‌گیری تنش پسماند [۶]..... ۲۵
- شکل ۲-۲۲: مراحل انجام روش Sachs Boring برای اندازه‌گیری تنش پسماند [۹]..... ۲۷

- شکل ۲-۲۳: روش Slitting و محل قرارگیری کرنش سنجها..... ۲۹
- شکل ۲-۲۴: سمت چپ اتصال کرنش سنج، وسط اتصال سیمها و راست ضد آب کردن با پوشش 3145RTV [۸]..... ۲۹
- شکل ۲-۲۵: توصیفی از اصول استفاده شده برای اندازه گیری تنش پسماند در روش کانتور با برش یک سطح [۱۲]..... ۳۱
- شکل ۲-۲۶: مراحل انجام روش کانتور [۱۳]..... ۳۲
- شکل ۲-۲۷: اصول به کار رفته در اندازه گیری تنش پسماند با روش X-Ray [۱۴]..... ۳۳
- شکل ۲-۲۸: قانون Bragg برای محاسبه فاصله بین اتمها و صفحات [۱۵]..... ۳۴
- شکل ۲-۲۹: اندازه گیری تنش پسماند در جوش یک لوله با استفاده از X-Ray [۱۴]..... ۳۴
- شکل ۲-۳۰: ساختار مجموعه تولید اشعه سنکرون، مجموعه Diamond Light Source انگلستان [۱]..... ۳۶
- شکل ۲-۳۱: مراکز تحقیقاتی دارای تجهیزات اندازه گیری تنش پسماند با روش پراش نوترونی [۱۶]..... ۳۶
- شکل ۲-۳۲: امواج آلتراسونیک عرضی [۱۷]..... ۳۷
- شکل ۲-۳۳: تأثیر تنش پسماند بر منحنی بار-جابجایی آزمون نانوفوذ [۱]..... ۳۹
- شکل ۳-۱: ساچمه زنی پره های توربین..... ۴۵
- شکل ۳-۲: دیاگرام عمومی تنش پسماند در عمق در اثر ساچمه زنی..... ۴۶
- شکل ۳-۳: تسمه آلمن..... ۴۷
- شکل ۳-۴: گبیج آلمن..... ۴۸
- شکل ۳-۵: رابطه میان ارتفاع قوس ها و زمان ساچمه زنی..... ۴۸
- شکل ۳-۶: تأثیر شدت ساچمه زنی بر تغییر شکل نوار آلمن..... ۴۹
- شکل ۳-۷: شماتیک فرایند LSP..... ۵۱
- شکل ۳-۸: دو روش مرسوم غلتک کاری سطح جوش [۲۳]..... ۵۲
- شکل ۳-۹: تجهیزات غلتک زنی حین جوشکاری [۲۴]..... ۵۳
- شکل ۳-۱۰: تأثیر فرایند غلتک کاری و بار اعمالی بر تنش پسماند جوش [۲۴]..... ۵۳
- شکل ۳-۱۱: شماتیک روش Deep Cold Rolling [۲۵]..... ۵۴
- شکل ۳-۱۲: بررسی اثر جهت حرکت و فشار بر تنش پسماند روش DCR [۲۵]..... ۵۵
- شکل ۳-۱۳: نمودار S-N مربوط به آلیاژ Ti-6Al-4V در دو دمای ۲۵ و ۴۵۰ درجه سانتیگراد و برای دو حالت ماده خام و اعمال DCR [۲۶]..... ۵۵
- شکل ۳-۱۴: ابعاد هندسی نمونه استفاده شده و شماتیکی از USRP [۳۲]..... ۵۶
- شکل ۳-۱۵: کانتورهای تنش پسماند برای تعداد دفعات تکرار مختلف در روش USRP [۳۲]..... ۵۷
- شکل ۳-۱۶: تأثیر USRP بر عمر خستگی آلیاژ Ti-6Al-4V [۳۲]..... ۵۷
- شکل ۳-۱۷: شماتیکی از مراحل روش ساچمه زنی آلتراسونیک [۳۳]..... ۵۸
- شکل ۳-۱۸: اجزای تشکیل دهنده دستگاه ساچمه زنی آلتراسونیک [۳۵]..... ۵۹
- شکل ۳-۱۹: تأثیر زمان انجام فرایند ساچمه زنی آلتراسونیک بر تنش پسماند آلومینیوم AA7075 [۳۸]..... ۶۰

- شکل ۳-۲۰: تعمیر پره توربین بخار فشار پایین با روش LPB در سایت..... ۶۳
- شکل ۳-۲۱: چپ: ابزار LBP تک نقطه و راست: اعمال LBP روی ایرفویل 7F R0..... ۶۳
- شکل ۳-۲۲: فرایند LPB روی فولاد ضد زنگ پره های مرحله اول کمپرسور توربوفن..... ۶۳
- شکل ۳-۲۳: اعمال روش LPB روی لبه پره توربین گاز..... ۶۴
- شکل ۳-۲۴: تأثیر دمای کاری بالا بر تنش های پسماند روش LPB [۴۱]..... ۶۵
- شکل ۳-۲۵: عملکرد روش LPB و ساچمه زنی بر خستگی پرچرخه IN718 در دمای بالا [۴۱]..... ۶۶
- شکل ۳-۲۶: داده های خستگی سایشی Ti-6Al-4V برای ماده زمینه، فرایند ساچمه زنی و LPB [۴۱]..... ۶۷
- شکل ۳-۲۷: مدل المان محدود و مقایسه سه روش اعمال تنش پسماند فشاری روی آلیاژ Ti-6Al-4V [۴۲]..... ۶۷
- شکل ۳-۲۸: تجهیزات روش آلتراسونیک پینینگ [۴۴]..... ۶۹
- شکل ۳-۲۹: ابزار آلتراسونیک پینینگ اختراع شده توسط Prokopenko و همکارانش [۴۵]..... ۷۰
- شکل ۳-۳۰: انواع مختلف سرهای UPT (a) یک سر چهار پینه با قطر پین ۳ mm (b) یک سر سه پینه با قطر پین mm..... ۷۰
- ۴، (c) یک سر هفت پینه با قطر پین ۵ mm و (d) یک سر تک پینه با قطر پین ۴ mm [46]..... ۷۰
- شکل ۳-۳۱: اصلاح هندسی گرده جوش توسط UPT [۴۶]..... ۷۱
- شکل ۳-۳۲: (a) وجود ناچ در گرده جوش یک نمونه بدون پینینگ، (b) بسته شدن ترک ها در گرده جوش با استفاده از UPT [۴۷]..... ۷۲
- شکل ۳-۳۳: تأثیر عملیات های مختلف بر بهبود عمر خستگی جوش فولاد Weldox 420 SSAB، (۱) جوش اولیه (۲) روش UPT با قطر پین ۵ mm، (۳) چکش زنی، (۴) ساچمه زنی، (۵) اصلاح با TIG، (۶) اصلاح با TIG و UPT، (۷) UPT با قطر پین ۳ mm [۴۸]..... ۷۳
- شکل ۳-۳۴: طریقه ایجاد حباب در روش Cavitation peening [۴۹]..... ۷۳
- شکل ۳-۳۵: اعمال روش Cavitation peening روی جوش [۴۹]..... ۷۴
- شکل ۳-۳۶: قبل و بعد از اعمال روش Cavitation peening [۴۹]..... ۷۴
- شکل ۳-۳۷: مقایسه روش ساچمه زنی و Cavitation peening..... ۷۵
- شکل ۳-۳۸: روش ساچمه زنی و Cavitation peening..... ۷۵
- شکل ۴-۱: مراحل مختلف عملیات حرارتی [۵۰]..... ۷۸
- شکل ۴-۲: تغییرات تنش تسلیم با دما [۵۱]..... ۷۹
- شکل ۴-۳: قرار دادن کل سازه داخل کوره جهت انجام تنش زدایی حرارتی..... ۸۰
- شکل ۴-۴: انجام عملیات حرارتی تنش زدایی روی بخشی از یک سازه..... ۸۰
- شکل ۴-۵: تجهیزات تنش زدایی ارتعاشی (شرکت VSR)..... ۹۲
- شکل ۴-۶: کاهش تنش متوسط تحت آزمایش کرنش ثابت با یک کرنش متوسط [۵۵]..... ۹۳
- شکل ۴-۷: افزایش کرنش با افزایش تعداد چرخه ها برای فولاد 304L [۵۶]..... ۹۳
- شکل ۴-۸: تأثیر سرعت اسکن بر تشخیص پیک های رزونانس سازه..... ۹۵
- شکل ۴-۹: تأثیر تنش زدایی ارتعاشی بر نمودار شتاب (دامنه) بر حسب سرعت نوسانگر..... ۹۶

- شکل ۴-۱۰: تجهیزات تنش‌زدایی ارتعاشی به کار گرفته شده توسط Munsî [۵۷]..... ۹۷
- شکل ۴-۱۱: تنش پسماند طولی در جوش بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی [۵۷]..... ۹۷
- شکل ۴-۱۲: تجهیزات مورد استفاده برای تنش‌زدایی فریم ۵۰۰ کیلوگرمی..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۳: نوسانگر مورد استفاده در دستگاه MX-8000..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۴: پکیج کامل دستگاه VSR 8000..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۵: نمودار Quick-Scan یک سازه ۵۰۰ کیلوگرمی..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۶: نمودار Pre-Treatment و Post-Treatment سازه ۵۰۰ کیلوگرمی..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۷: استفاده از تنش‌زدایی ارتعاشی جهت رفع اعوجاج یک سازه با وزن ۲۵ تن..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۸: کنسول‌های دستگاه تنش‌زدایی مدل META-LAX..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۹: تنش‌زدایی ارتعاشی روی شاتل..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۰: فرکانس استفاده شده برای انجام تنش‌زدایی..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۱: تنش‌زدایی ارتعاشی با استفاده از META-LAX..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۲: نمودار دامنه نوسان قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی با دستگاه META-LAX..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱: تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده در محور کمپرسور محوری [۵۰]..... ۱۱۱
- شکل ۵-۲: تنش پسماند فشاری ناشی از سه فرایند لیزر پینینگ، LPB و ساچمه زنی [۴۲]..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳: تأثیر توان لیزر بر میزان تنش پسماند ایجاد شده [۵۳]..... ۱۱۳
- شکل ۵-۴: تأثیر دو فرایند LSP، LSPWC و همچنین ساچمه‌زنی بر تنش پسماند [۵۳]..... ۱۱۳
- شکل ۵-۵: نمونه از اتصال دو بخش روتور یک توربین بخار به کمک جوشکاری [۵۴]..... ۱۱۴
- شکل ۵-۶: تأثیر درصد پوشش ساچمه زنی بر تنش پسماند از روش XRD [۵۷]..... ۱۱۵
- شکل ۵-۷: تأثیر تعداد سیکل‌های خستگی بر آسایش تنش برای حالتی که توربین در حالت overload کار کند [۵۷]..... ۱۱۵
- شکل ۵-۸: اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین بخار با استفاده از دستگاه X-Ray [۵۷]..... ۱۱۶
- شکل ۵-۹: تأثیر تعداد چرخه‌های خستگی بر مقدار تنش پسماند ناشی از ساچمه زنی در پره توربین بخار [۵۸]..... ۱۱۶
- شکل ۵-۱۰: میکرو شیار ایجاد شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند [۵۹]..... ۱۱۷
- شکل ۵-۱۱: کانتور دما و تنش پسماند ایجاد شده ناشی از جوشکاری Lacing Wire پره توربین بخار [۶۰]..... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۲: شماتیکی از دستگاه FTHP که یک نمونه از بخش T شکل روتور جدا میکند. [۶۱]..... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۳: مراحل نمونه برداری و تعمیر با استفاده از روش FTHP [۶۲]..... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۴: مراحل سوراخکاری و جوشکاری با استفاده از روش FTHP روی یک روتور توربین بخار [۶۱]..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱۵: تعمیرات انجام گرفته روی tenon پرخ توربین بخار [۶۲]..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱۶: هندسه بخش جوشکاری شده و گرده جوش شروود پره توربین گاز [۶۳]..... ۱۲۰
- شکل ۵-۱۷: راست: دو موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها، چپ: محل اندازه‌گیری تنش پسماند [۶۳]..... ۱۲۰
- شکل ۵-۱۸: محل نصب کرنش‌سنج و اندازه‌گیری تنش پسماند [۶۴]..... ۱۲۱

- شکل ۱۹-۵: تنش‌های پسماند طولی و عرضی ایجاد شده در جوش نازل بویلر و مقایسه با نتایج عددی [۶۵]..... ۱۲۲
- شکل ۲۰-۵: پوشش لوله با فولاد ضد زنگ [۶۶]..... ۱۲۲
- شکل ۲۱-۵: تنش پسماند ایجاد شده در لوله‌ها ناشی از cladding [66]..... ۱۲۳
- شکل ۲۲-۵: تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی و نقاط اندازه‌گیری تنش پسماند در بویلر [۶۸]..... ۱۲۴
- شکل ۲۳-۵: تأثیر فشار هیدرواستاتیکی بر تنش پسماند اتصال جوش لوله به تیوب شیت [۶۹]..... ۱۲۵
- شکل ۲۴-۵: (a) ترک ایجاد شده، (b) تنش پسماند و (c) کرنش پلاستیک ایجاد شده پس از جوشکاری [۷۰]..... ۱۲۶
- شکل ۲۵-۵: مقادیر تنش پسماند محیطی و محوری جوش لوله بویلر [۷۱]..... ۱۲۶
- شکل ۲۶-۵: راست: آسیب ایجاد شده در لوله بویلر، سمت چپ: نمونه‌های بریده شده از لوله آسیب دیده [۷۲]..... ۱۲۷
- شکل ۲۷-۵: تجهیزات سوراخکاری مرکزی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله آسیب دیده بویلر [۷۲]..... ۱۲۷
- شکل ۲۸-۵: تأثیر دمای ۳۲۵ و ۴۷۵ درجه سانتیگراد بر آسایش تنش آلیاژ Ti-6Al-4V بعد از ساچمه زنی [۷۳]..... ۱۲۸
- شکل ۲۹-۵: تأثیر دمای ۳۲۵ و ۴۷۵ درجه سانتیگراد بر آسایش تنش آلیاژ Ti-6Al-4V بعد از لیزر پینینگ [۷۳]..... ۱۲۸
- شکل ۳۰-۵: تأثیر دمای ۵۲۵ و ۶۷۰ درجه سانتیگراد بر آسایش تنش آلیاژ Inconel 718 بعد از ساچمه زنی [۷۳]..... ۱۲۹
- شکل ۳۱-۵: تأثیر دمای ۵۲۵ و ۶۷۰ درجه سانتیگراد بر آسایش تنش آلیاژ Inconel 718 بعد از لیزر پینینگ [۷۳]..... ۱۲۹
- شکل ۱-۶: مراحل انجام روش کانتور [۱۱]..... ۱۳۲
- شکل ۲-۶: شماتیک روش ماشین کاری WEDM [۷۴]..... ۱۳۳
- شکل ۳-۶: ماشینکاری با روش WEDM..... ۱۳۴
- شکل ۴-۶: برآمدگی ایجاد شده (bulge error) طی فرایند WEDM [۱]..... ۱۳۵
- شکل ۵-۶: طریقه فیکس کردن نمونه طی فرایند WEDM [۱]..... ۱۳۵
- شکل ۶-۶: بالا: دستگاه CMM تماسی و پایین: دستگاه CMM لیزری..... ۱۳۷
- شکل ۷-۶: عکس العمل‌های سطح در ناحیه برش خورده [۱۱]..... ۱۳۷
- شکل ۸-۶: رویه عبور داده شده از داده‌های خام CMM [۱۱]..... ۱۳۸
- شکل ۹-۶: المان بندی و شرایط مرزی اعمالی به مدل المان محدود در روش کانتور [۱]..... ۱۳۹
- شکل ۱۰-۶: مدل المان محدود دو بعدی پس از اعمال تغییر شکل‌های سطح برش و اعمال شرایط مرزی [۱۱]..... ۱۳۹
- شکل ۱۱-۶: بالا: مقادیر تنش‌های پسماند واقعی در نمونه، پایین: مقادیر تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده با روش کانتور [۱۱]..... ۱۴۰
- شکل ۱۲-۶: هندسه لوله و ورق جوش داده شده در مرجع [۷۵]..... ۱۴۱
- شکل ۱۳-۶: تنش پسماند در جوش چند پاسه لوله [۷۵]..... ۱۴۱
- شکل ۱۴-۶: تنش پسماند در راستای طولی (بالا) و عرضی (پایین) جوش ورق تیتانیوم [۷۵]..... ۱۴۲
- شکل ۱۵-۶: کارایی روش کانتور در محاسبه تنش پسماند جوش [۷۶]..... ۱۴۳
- شکل ۱۶-۶: راست: هندسه نمونه لایه نشانی شده چپ: طریقه فیکس کردن برای برش WEDM [۷۷]..... ۱۴۳
- شکل ۱۷-۶: تنش‌های پسماند ناشی از لایه نشانی فولاد ضد زنگ روی فولاد کم کربن [۷۷]..... ۱۴۴
- شکل ۱۸-۶: مقایسه دو روش کانتور و پراش نوترونی در اندازه‌گیری تنش پسماند لایه نشانی [۷۷]..... ۱۴۴

- شکل ۱۹-۶: بالا: اعوجاج سطح اندازه‌گیری شده با CMM و پایین: تنش پسماند در جوش پایه توربین بادی فراساحل [۷۸] ۱۴۵
- شکل ۲۰-۶: کارایی روش کانتور در اندازه‌گیری تنش پسماند جوش چند پاسه [۷۹] ۱۴۵
- شکل ۲۱-۶: موقعیت کرنش‌سنج‌ها نسبت به سوراخ مرکزی [۳] ۱۴۷
- شکل ۲۲-۶: یک نمونه از کرنش اندازه‌گیری شده و تنش‌های پسماند به دست آمده از محاسبات [۳] ۱۴۷
- شکل ۲۳-۶: انواع مختلف کرنش‌سنج برای استفاده در سوراخکاری مرکزی [۴] ۱۴۸
- شکل ۲۴-۶: دو نمونه از دستگاه‌های ایجاد سوراخ در روش سوراخکاری مرکزی [۱] ۱۵۱
- شکل ۲۵-۶: مجموعه تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی ۱۵۲
- شکل ۲۶-۶: چپ: اتصال کرنش‌سنج به نمونه، وسط: اتصال سیم‌ها به کرنش‌سنج و راست: ایجاد سوراخ با دریل مخصوص [۱] ۱۵۲
- شکل ۲۷-۶: مته‌های استفاده شده برای ایجاد سوراخ در روش سوراخکاری مرکزی [۱] ۱۵۲
- شکل ۲۸-۶: حوزه مغناطیسی و گشتاورهای مغناطیسی اتم‌ها [۸۸] ۱۵۴
- شکل ۲۹-۶: حوزه‌های مغناطیسی با جهت‌های مغناطیسی تصادفی ۱۵۴
- شکل ۳۰-۶: دیواره‌های مغناطیسی ۱۸۰ درجه [۸۹] ۱۵۵
- شکل ۳۱-۶: منحنی شماتیک هیستریزیس مواد فرومغناطیسی [۱] ۱۵۷
- شکل ۳۲-۶: ولتاژهای پالسی حاصل از سیگنال‌های Barkhausen [۸۸] ۱۵۸
- شکل ۳۳-۶: مراحل اندازه‌گیری به روش MBN [۸۸] ۱۵۹
- شکل ۳۴-۶: پراب MBN فرکانس بالا، سمت چپ برای سطوح صاف و سمت راست برای سطح چرخنده [۱] ۱۶۰
- شکل ۳۵-۶: پراب MBN فرکانس پایین، سمت چپ برای سطوح صاف و سمت راست برای سطح چرخنده [۱] ۱۶۰
- شکل ۱-۷: دستگاه XRD پرتابل برای اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله‌ها ۱۶۳
- شکل ۲-۷: دستگاه پرتابل X-ray شرکت PULSTEC با نام تجاری μ -X360 ۱۶۴
- شکل ۳-۷: کاربرد دستگاه پرتابل شرکت PULSTEC در اندازه‌گیری تنش پسماند برای قطعات مختلف ۱۶۴
- شکل ۴-۷: دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند XRD رباتیک شرکت MRX ۱۶۵
- شکل ۵-۷: دستگاه پرتابل XRD شرکت Protoxrd ۱۶۵
- شکل ۶-۷: دستگاه MTS3000-restan شرکت MTS، اندازه‌گیری تنش پسماند پره توربین گاز ۱۶۶
- شکل ۷-۷: تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی شرکت Stresstech به همراه تجهیزات ESPI ۱۶۶
- شکل ۸-۷: اجزای دستگاه MTS3000-ringcore شرکت MTS ۱۶۷
- شکل ۹-۷: یک نمونه از برش ایجاد شده روی یک لوله توسط MTS3000-ringcore ۱۶۷
- شکل ۱۰-۷: دستگاه 3MA micro magnetic برای اندازه‌گیری تنش پسماند با روش میدان مغناطیسی ۱۶۸
- شکل ۱۱-۷: کاربرد دستگاه 3MA micro magnetic برای اندازه‌گیری تنش پسماند ۱۶۸
- شکل ۱۲-۷: دستگاه EQUINOX3000 دانشگاه امیرکبیر ۱۶۹
- شکل ۱۳-۷: نمایی از دستگاه XRD دانشگاه علم و صنعت ۱۷۰
- شکل ۱۴-۷: نمایی از دستگاه XRD دانشگاه تربیت مدرس ۱۷۰

- شکل ۷-۱۵: دستگاه سوراخکاری مورد استفاده در دانشگاه بوعلی سینا همدان ۱۷۱
- شکل ۷-۱۶: تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند به روش آلتراسونیک در لوله‌ها، دانشگاه امیرکبیر [۹۴] ۱۷۱
- شکل ۷-۱۷: تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند به روش آلتراسونیک در صفحات، دانشگاه امیرکبیر [۹۵] ۱۷۲
- شکل ۷-۱۸: انجام Slitting برای اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق و در دو جهت در دانشگاه بوعلی سینا همدان [۹۶] ۱۷۲
- شکل ۷-۱۹: پروب فرسوده و گیرنده ساخته شده برای روش اندازه‌گیری نویز مغناطیسی در دانشگاه زنجان [۹۷] ۱۷۳
- شکل ۸-۱: اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین گاز با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی ۱۷۶
- شکل ۸-۲: اندازه‌گیری تنش پسماند در پره توربین ۱۷۶
- شکل ۸-۳: اندازه‌گیری تنش پسماند در روتور یک واحد نیروگاهی ۱۷۶
- شکل ۸-۴: اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در جوش یک لوله با روش سوراخکاری مرکزی ۱۷۷
- شکل ۸-۵: تجهیزات سوراخکاری مرکزی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله آسیب دیده بویلر [۷۲] ۱۷۷
- شکل ۸-۶: تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی و نقاط اندازه‌گیری تنش پسماند در بویلر [۶۸] ۱۷۸
- شکل ۸-۷: هندسه بخش جوشکاری شده و گرده جوش شروع پره توربین گاز [۶۳] ۱۷۸
- شکل ۸-۸: راست: دو موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها، چپ: محل اندازه‌گیری تنش پسماند [۶۳] ۱۷۹
- شکل ۸-۹: یک نمونه از اندازه‌گیری تنش پسماند در جوش با استفاده از روش کانتور [۹۸] ۱۷۹
- شکل ۸-۱۰: راست: هندسه نمونه لایه نشانی شده چپ: طریقه فیکس کردن برای برش WEDM [۷۷] ۱۸۰
- شکل ۸-۱۱: یک نمونه اندازه‌گیری تنش پسماند در پره توربین توسط دستگاه XRD ۱۸۰
- شکل ۸-۱۲: اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین بخار با استفاده از دستگاه X-Ray [۵۷] ۱۸۱
- شکل ۹-۱: موارد بررسی شده در فاز یک پروژه ۱۸۴

فهرست جداول

جدول ۱-۱: منابع اصلی تولید تنش پسماند در پروسه‌های ساخت [۲].....	۵
جدول ۲-۱: مقایسه اندازه‌گیری کرنش با استفاده از کرنش‌سنج و استفاده از روش‌های اپتیکی [۱].....	۲۱
جدول ۲-۲: خصوصیات انواع روش‌های اپتیکی اندازه‌گیری کرنش [۱].....	۲۱
جدول ۲-۳: قطر سوراخ‌های ایجاد شده در روش سوراخکاری عمیق [۱].....	۲۳
جدول ۲-۴: مقایسه عملکرد روش‌های مختلف اندازه‌گیری تنش پسماند [۱].....	۴۱
جدول ۲-۵: مشخصه‌های روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند. X حدودی و XX همیشه وجود دارد [۱].....	۴۳
جدول ۳-۱: تأثیر عملیات ساچمه زنی بر افزایش عمر خستگی قطعات مختلف [۲].....	۴۹
جدول ۳-۲: پارامترهای اساسی استفاده شده در USRP [۳۲].....	۵۶
جدول ۳-۳: مقایسه دو روش ساچمه زنی آلتراسونیک و ساچمه زنی با جریان هوا [۳۴].....	۵۹
جدول ۳-۴: سختی، ابعاد دانه و ضخامت لایه نانوکریستال شده فلزات مختلف با اعمال روش SMAT [۳۹].....	۶۱
جدول ۳-۵: تأثیر روش SMAT بر تنش تسلیم و تنش نهایی [۳۹].....	۶۱
جدول ۳-۶: مقایسه قابلیت‌های روش LPB با روشهای دیگر ایجاد تنش پسماند فشاری [۴۰].....	۶۴
جدول ۴-۱: دمای و زمان نگهداری طبق استاندارد ASME B31.3، جدول 331.1.1 [۵۲].....	۸۴
جدول ۴-۲: الزامات روش جایگزین PWHT برای فولادهای کربنی و کم آلیاژ، P-Num=1,3 [۵۲].....	۸۵
جدول ۴-۳: شرایط PWHT طبق استاندارد ASME BPVC برای فولادهای P-Num=1.....	۸۶
جدول ۴-۴: روش جایگزین برای PWHT فولادهای کربنی و کم آلیاژ.....	۸۷
جدول ۴-۵: حداقل زمان نگهداری در فرایند PWHT طبق استاندارد AWS D1.1 [۵۴].....	۸۸
جدول ۴-۶: تأثیر تنش زدایی ارتعاشی بر تنش پسماند عرضی جوس فولاد آستنیتی [۷۲].....	۹۹
جدول ۵-۱: مقادیر تنش پسماند به دست آمده از آلمان محدود و سوراخکاری مرکزی [۶۳].....	۱۲۱
جدول ۶-۱: قطر سیم پیشنهادی برای روش WEDM [۱].....	۱۳۴
جدول ۶-۲: مقادیر پیشنهادی برای ضخامت نمونه، قطر سوراخ و عمق گام‌ها [۴].....	۱۴۹
جدول ۶-۳: مقادیر ضرایب a و b برای رزت نوع A و تنش یکنواخت.....	۱۵۰

مقدمه

تنش پسماند بر اثر انجام فرآیندهای ساخت همانند جوشکاری، شکل‌دهی، ریخته‌گری و غیره در جسم باقی می‌ماند و در حالی که جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست وجود دارد. تنش‌های پسماند در اثر تغییرات شدید و غیر یکنواخت دما، اعمال بارهای مکانیکی فراتر از حد تسلیم و تغییر فاز مواد در سازه‌ها ایجاد می‌شود. علت اینکه شناسایی چنین تنش‌هایی مهم است این است که وقتی جسم تحت تنش خارجی قرار می‌گیرد، این تنش خارجی به تنش پسماند موجود افزوده می‌شود. علاوه بر تنش‌هایی که در اثر ساخت و به صورت نامطلوب در سازه ایجاد می‌شود، در برخی موارد جهت افزایش عمر سازه با ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح ماده عمر خستگی سازه را افزایش می‌دهند. برای نمونه می‌توان روش‌های شات پینینگ، لیزر پینینگ، آلتراسونیک پینینگ، اتوفرتاژ و غیره را نام برد. باید توجه داشت که تنش‌های پسماند در تعادل هستند و اعمال تنش فشاری بسیار زیاد می‌تواند سبب ایجاد مقادیر بالای تنش کششی در نواحی دیگر سازه گردد.

علی‌رغم پیشرفت‌هایی که در مدلسازی تنش‌های پسماند با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود صورت گرفته است، اما باز هم در بسیاری از روش‌های ساخت و به دلیل تغییرات متالورژیکی، امکان مدلسازی دقیق تنش پسماند وجود نداشته و لازم است که با استفاده از روش‌های تجربی، مقادیر تنش پسماند اندازه‌گیری شود. برای این منظور بیش از بیست روش مختلف اندازه‌گیری تنش پسماند توسعه یافته است که هر کدام از آنها قابلیت‌ها و معایب خاصی دارند و لازم است که برای هر کاربرد خاص، بهترین روش انتخاب شود. در کاربردهای نیروگاهی نیز بسته به شرایط قطعه، شرایط محیط، شرایط کارکرد و همچنین امکانات موجود در کشور لازم است که یک روش مطمئن و کم هزینه انتخاب شود. در این تحقیق سعی شده است که با معرفی اکثر روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، برای کاربرد خاص قطعات نیروگاهی بهترین آنها معرفی و تشریح شوند.

در این گزارش در ابتدا، سه موضوع اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، اعمال تنش پسماند فشاری و تنش‌زدایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند بیشترین سهم از این گزارش را به خود اختصاص داده است. سپس از بین روش‌های مختلف اندازه‌گیری تنش پسماند سه روش اندازه‌گیری تنش پسماند با روش کانتور، روش سوراخکاری مرکزی و روش میدان مغناطیسی با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این سه روش با توجه به امکانات موجود در کشور قابلیت استفاده بیشتری دارند و امکان ساخت تجهیزات و یا استفاده از آنها در پژوهشگاه نیرو نیز وجود دارد. همچنین تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند در داخل کشور و تجهیزات تجاری شده اندازه‌گیری تنش پسماند در خارج از کشور معرفی شده و روش‌های مناسب برای اعمال تنش پسماند، تنش‌زدایی و اندازه‌گیری تنش پسماند در اجزای نیروگاهی با توجه به امکانات موجود در کشور تعیین خواهد شد. در نهایت آینده اندازه‌گیری تنش پسماند و نتایج کلی این پروژه بیان می‌گردد.

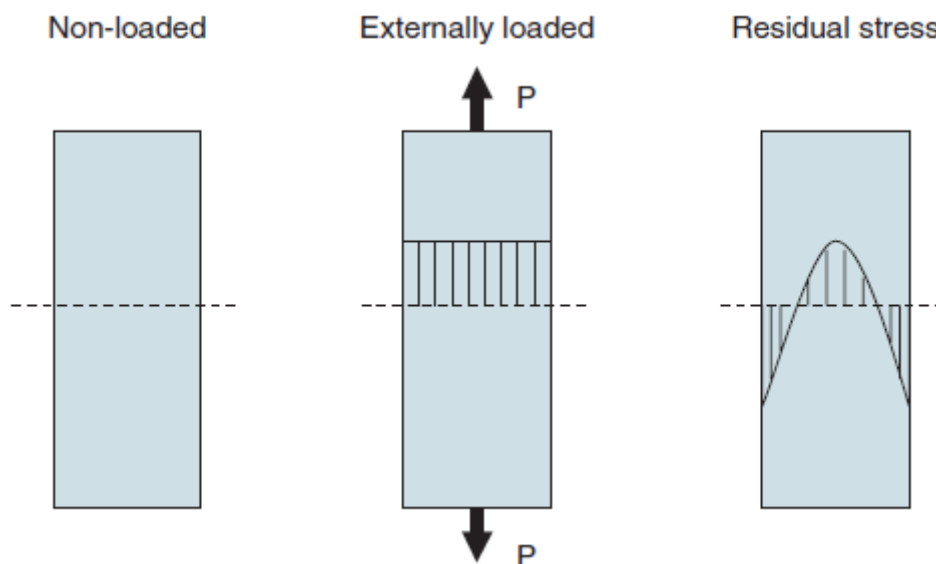
۱- فصل اول: ماهیت تنش‌های پسماند

۱-۱- مقدمه

در این فصل به صورت خلاصه ماهیت تنش پسماند، دلایل ایجاد تنش پسماند و اثرات تنش پسماند مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۲- ماهیت تنش پسماند

تنش پسماند تنش‌هایی هستند که مستقل از بار اعمالی در جسم وجود دارند. این تنش‌ها متعادل هستند به عبارتی بخشی از آن‌ها کششی و بخشی دیگر فشاری می‌باشند. در شکل ۱-۱ سه حالت مختلف تصویر شده است. در سمت چپ ماده تحت هیچ باری نیست و در نتیجه تنشی نیز در آن ایجاد نشده است. در مدل میانی بار خارجی به جسم وارد شده است و متناسب با آن در جسم تنش بوجود آمده است. اما در شکل سمت راست بدون اعمال هیچ بار خارجی، در جسم تنش وجود دارد که به این نوع از تنش‌ها، تنش پسماند می‌گوییم.



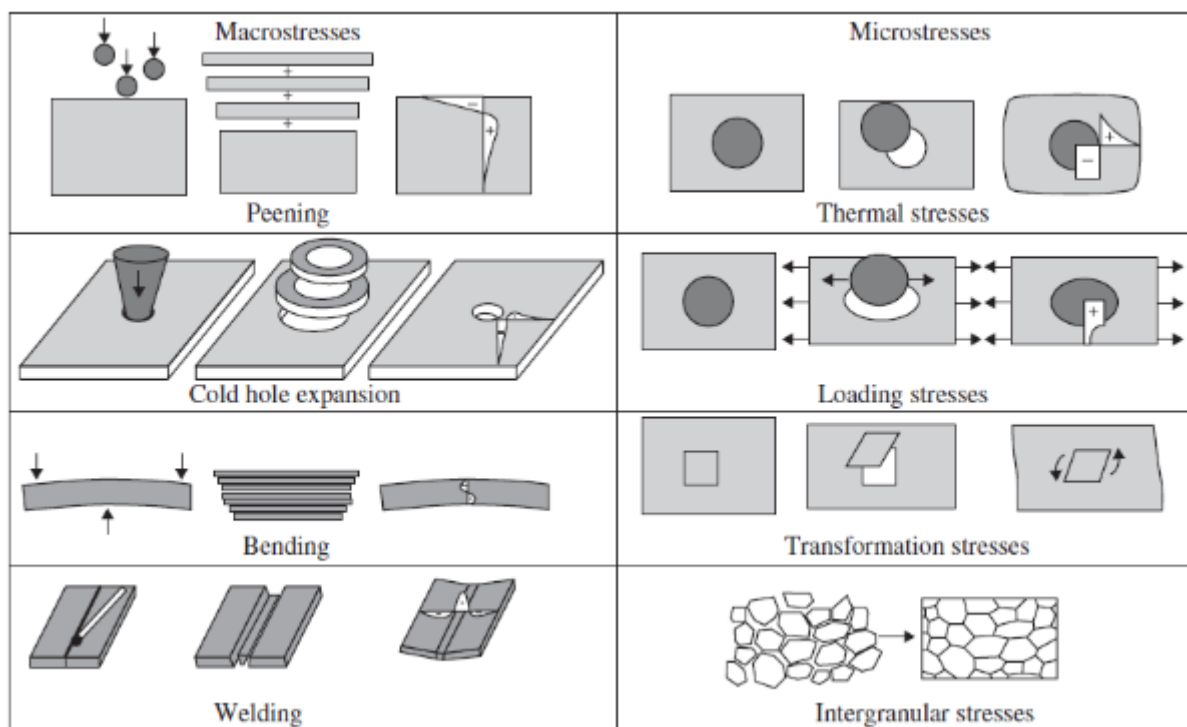
شکل ۱-۱: حالات مختلف بارگذاری بر یک جسم [۱]

- تقریباً در اثر همه پروسه‌های ساخت مواد، تنش پسماند ایجاد می‌شود. مکانیزم‌های تشکیل تنش پسماند عبارتند از:
- ۱- تغییر شکل پلاستیک غیریکنواخت: پروسه‌های ساخت که شکل یک ماده را تغییر می‌دهد همانند آهنگری، خم‌کاری، کشش و غلتک کاری
 - ۲- اصلاح سطح: پروسه‌هایی همانند ماشین‌کاری، سنگ‌زنی، پینینگ و کربونیزه کردن و هم‌چنین خوردگی و اکسیداسیون در حین فعالیت قطعه

۳- تغییر فاز یا تغییر چگالی ماده: اغلب به دلیل گرادیان حرارتی بسیار شدید اتفاق می‌افتد که می‌توان از آن جمله فرآیندهای جوشکاری، ریخته‌گری، کوئنچ کردن، تغییر فاز در مواد و سرامیک‌ها، رسوب سختی^۱ در آلیاژها و پلیمریزاسیون در پلاستیک‌ها را نام برد.

در شکل زیر برخی از روش‌هایی که سبب ایجاد تنش پسماند می‌شوند، نمایش داده شده است. در بالا سمت چپ، فرایند ساچمه‌زنی جهت ایجاد تنش پسماند فشاری تصویر شده است. با برخورد ذرات فلزی سطح ماده وارد ناحیه پلاستیک می‌شود اما لایه‌های دورتر در ناحیه الاستیک باقی مانده و در برابر تغییر شکل مانع ایجاد می‌کنند که همین امر، سبب ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح و تنش پسماند کششی در لایه‌های زیرین می‌شود. مکانیزم مشابهی در گشاد کردن سوراخ و خم‌کاری اتفاق می‌افتد. تغییرات فاز همانند تغییر فاز مارتنزیتی در فولادها سبب تغییر ابعاد یک بخش از ماده نسبت به محیط اطراف می‌شود که نتیجه آن ایجاد تنش پسماند در جسم است.

انجماد و انقباض جزئی در جوشکاری سبب ایجاد تنش پسماند کششی بسیار بزرگی (در نزدیکی تنش تسلیم) در جوش می‌شود. فلز مذاب خط جوش و ناحیه HAZ از دمای بسیار بالایی شروع به سرد شدن و انجماد می‌کنند و این در حالی است که فلز اطراف دمای کمتری داشته و تمایلی به انقباض ندارد و به همین جهت تنش کششی بسیار بزرگی در ناحیه HAZ ایجاد می‌شود. جهت حفظ تعادل در جسم، در نواحی خارج از HAZ تنش پسماند فشاری خواهیم داشت.



شکل ۱-۲: برخی از روش‌هایی که سبب ایجاد تنش پسماند می‌شوند [۱]

در جدول زیر نیز منابع اصلی تولید تنش پسماند در پروسه‌های ساخت آورده شده است.

^۱ precipitation hardening

جدول ۱- ۱: منابع اصلی تولید تنش پسماند در پروسه‌های ساخت [۲]

Process	Mechanical	Thermal	Structural
Casting	No	Temperature gradient during cooling	Phase transformation
Shot peening, hammer peening, roller burnishing, laser shock treatment, bending, rolling, chasing, forging, straightening, extrusion	Heterogeneous plastic deformation between the core and surface of the part	No	Depends on the material
Grinding, turning, milling, drilling, boring	Plastic deformation due to the removal of chips	Temperature gradient due to heating during machining	Phase transformation during machining if the temperature is sufficiently high
Quenching without a phase transformation	No	Temperature gradient	No
Surface quenching with a phase change (induction, EB, laser, plasma, chemical methods)	No	Temperature gradient	Change of volume due to a phase change
Case hardening, nitriding	No	Thermal incompatibility	New chemical component with volume modification
Welding	Shrinkage	Temperature gradient	Microstructural change (HAZ)
Brazing	Mechanical incompatibility	Thermal incompatibility	New phase at interface
Electroplating	Mechanical incompatibility	Mechanical incompatibility	Composition of plating depending on bath used
Thermal spraying (plasma, laser, HVOF)	Mechanical incompatibility, microcracking	Thermal incompatibility, temperature gradient	Change of phase in plating
PVD, CVD	Mechanical incompatibility	Mechanical incompatibility	Change of phase
Composite	Mechanical incompatibility	Mechanical incompatibility	No

EB, electron beam; HVOF, high velocity oxygen fuel; HAZ, heat affected zone

۳-۱- تأثیرات تنش پسماند

با توجه به خود تعادل بودن تنش‌های پسماند وجود آن‌ها در یک قطعه کاملاً آشکار نیست و ممکن است که توسط بسیاری از مهندسان نادیده گرفته شود. اما وقتی که یک بار خارجی به جسم اعمال می‌شود، ممکن است که آسیب زیادی ایجاد شود. البته لازم به ذکر است که حضور تنش پسماند لزوماً یک امر منفی قلمداد نشده و در بسیاری از موارد جهت مقابله با تنش کششی زیاد، در جسم تنش پسماند فشاری ایجاد می‌کنند. آسیب در بسیاری از مواد با رشد ترک همراه است و معمولاً ترک‌ها در سطح ایجاد می‌شوند، به همین جهت تنش پسماند فشاری در سطح سبب به تأخیر انداختن جوانه‌زنی و رشد ترک در سطح خواهد شد. دلیل انجام فرایند ساچمه‌زنی روی فلزات همین امر می‌باشد.

تنش‌های پسماند می‌توانند بسیار مضر نیز باشند و منجر به کاهش مقاومت مواد و شکست پیش از موعد شوند. در شکل زیر شکست در بیل آلومینیوم ریخته‌گری کاملاً واضح است که دلیل آن تنش‌های پسماندی است که به دلیل سرد شدن ناهمگون پس از انجماد در فرایند ریخته‌گری ایجاد شده‌اند.



شکل ۱- ۳: شکست در بیل آلومینیوم ریخته‌گری به سبب تنش پسماند [۱]

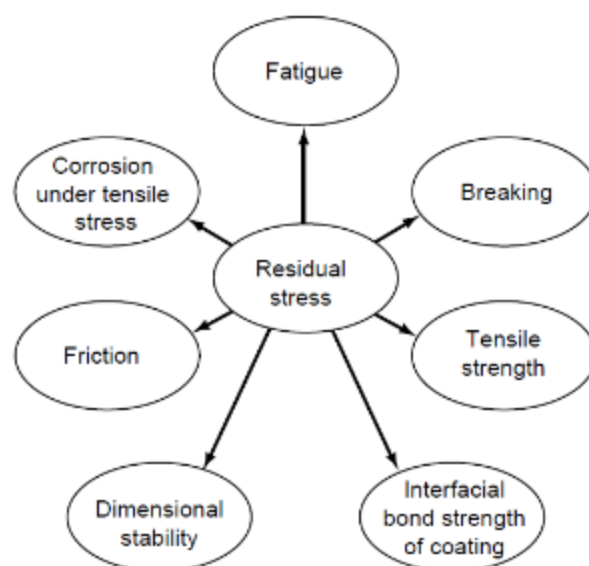
اگر یک جسمی که حاوی تنش پسماند است، قسمتی از آن بریده شود در آن مقطع تنش پسماند آزاد شده و تنش پسماند در مابقی جسم به گونه‌ای بازتوزیع می‌شود که تعادل در جسم حفظ گردد. به سبب آزاد شدن تنش پسماند و باز توزیع آن، کرنش‌هایی در جسم ایجاد خواهد شد که سبب تغییر شکل جسم می‌شوند و در برخی مواقع سبب اشکال در کارکرد سازه می‌شوند. برای نمونه در شکل زیر یک قطعه از بخش بار یک هواپیما نمایش داده شده که برای کاهش وزن، بخش‌های زیادی از آن ماشین‌کاری شده است. عملیات آهنگری که برای ساخت این سازه انجام گرفته سبب ایجاد تنش پسماند در آن شده که آزادسازی آن در حین فرایند ماشین‌کاری سبب تغییر شکل مشاهده شده در شکل زیر شده است.

در مواقعی که نیاز به دقت بسیار وجود دارد اعوجاج پس از ماشین‌کاری می‌تواند استفاده از آن قطعه را ناممکن سازد. راه مستقیم حذف این تغییر شکل، کاهش تنش پسماند ایجاد شده در حین ساخت و یا انجام عملیات حرارتی پس از ساخت و قبل از ماشین‌کاری است. راه دیگر انجام فرایند ماشین‌کاری به صورت مرحله‌ای و متقارن است تا اعوجاج کمتری در قطعه بوجود آید.



شکل ۱-۴: اعوجاج ایجاد شده در سازه بخش بار یک هواپیما پس از انجام فرایند ماشین‌کاری [۱]

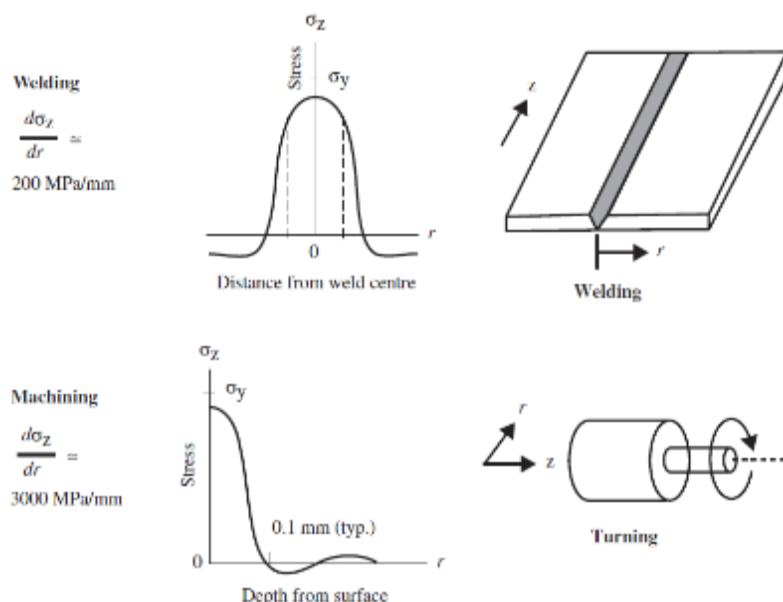
تنش پسماند به طور مستقیم بر خستگی، شکست، پایداری ابعادی، خوردگی تحت تنش کششی، اتصال زمینه و پوشش و ... تأثیر می‌گذارد (شکل ۱-۵)



شکل ۱-۵: تأثیر تنش پسماند بر عملکرد مواد [۲]

۴-۱- گرادیان تنش پسماند

از آنجایی که تنش‌های پسماند با وجود نبود نیروی خارجی در سازه وجود دارند به همین جهت لازم است که این تنش‌ها در تعادل باشند و جمع آن‌ها صفر باشد. به همین جهت در بخشی از ماده تنش پسماند کششی و در بخشی دیگر باید تنش پسماند فشاری حضور داشته باشد. همین امر سبب شده که گرادیان تنش قابل توجهی در برخی از فرایندها وجود داشته باشد. برای نمونه در شکل ۱-۶ شاهد گرادیان تنش 200 MPa/mm در نزدیکی خط جوش هستیم. همچنین گرادیان تنش MPa/mm 3000 در فاصله سطح تا عمق 0.1 mm در یک فرایند ماشین‌کاری ایجاد می‌شود.



شکل ۱-۶: گرادیان تنش در دو فرایند جوشکاری و ماشین‌کاری [۱]

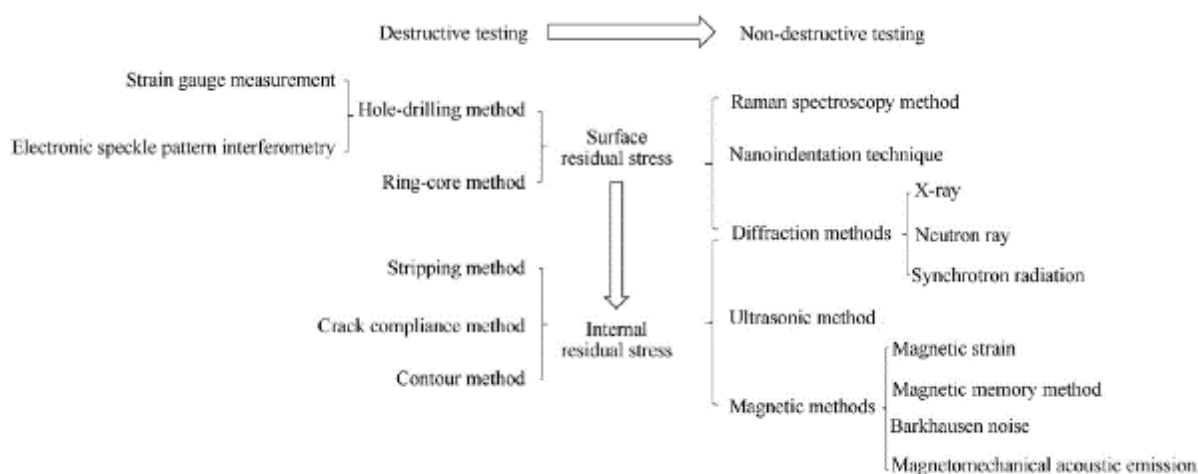
۲- فصل دوم: روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند

۱-۲- مقدمه

در این فصل روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور در ابتدا خلاصه‌ای از دو دسته از روش‌های اندازه‌گیری تنش شامل روش‌های مبتنی بر آزادسازی تنش و مبتنی بر پراش شرح داده شده و سپس روش‌های مختلف اندازه‌گیری تنش به تفصیل بیان خواهند شد.

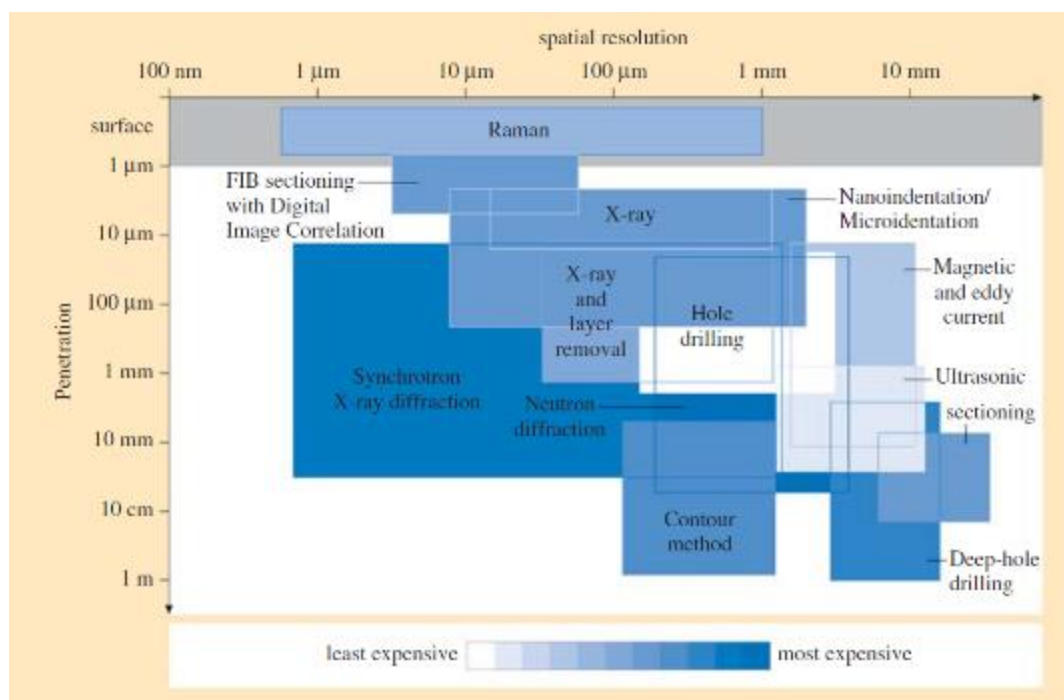
۲-۲- روش‌های کلی اندازه‌گیری تنش پسماند

با توجه به مباحث مطرح شده در فصل اول، برای بسیاری از کاربردهای مهندسی لازم است که تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شوند. روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به سه دسته کلی مخرب، نیمه مخرب و غیرمخرب تقسیم بندی می‌شوند. در روش‌های مخرب، یک نمونه از جسم کاملاً از بین رفته و نمونه مذکور دیگر قابلیت استفاده ندارد. در روش‌های نیمه مخرب، معمولاً آسیب‌های جزئی مانند یک سوراخ با قطر و عمق بسیار کم در سازه ایجاد می‌شود که می‌توان با روش‌های مختلفی بخش آسیب دیده را ترمیم کرد. در روش‌های غیر مخرب هیچ آسیبی به سازه وارد نمی‌شود اما معمولاً روش‌های پرهزینه‌ای می‌باشند. هر کدام از این سه دسته شامل چندین روش اندازه‌گیری تنش می‌باشند که بسته به شرایط محیط، جنس قطعه، اندازه تنش پسماند، دقت اندازه‌گیری، ابعاد نمونه و یکی از آن‌ها انتخاب می‌شود. در شکل زیر دسته بندی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند از منظر تخریب ایجاد شده روی قطعه، نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱: دسته بندی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند از منظر تخریب ایجاد شده روی قطعه [۱]

هر کدام از روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند قادر به اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق مشخصی می‌باشند. بسته به روش استفاده شده برای اعمال یا ایجاد تنش پسماند، بایستی از یکی از روش‌های موجود استفاده کرد. برای نمونه از آنجایی که در روش ساچمه‌زنی تنش پسماند در عمق بسیار کمی ایجاد می‌شود، می‌توان از روش‌هایی که عمق اندازه‌گیری پایینی دارند استفاده کرد. اما برای روش‌هایی مانند لیزرپنینگ که عمق تنش پسماند بالایی دارند، روش‌های محدودی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در این روش وجود دارد.



شکل ۲-۲: دسته بندی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند از منظر عمق اندازه‌گیری تنش پسماند [۱]

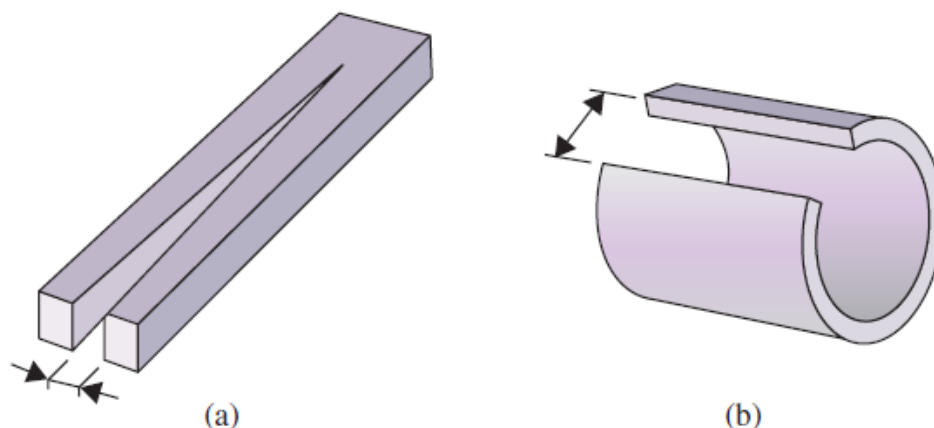
اکثر روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند مبتنی بر دو روش می‌باشند، روش‌های مبتنی بر آزادسازی تنش و روش‌های مبتنی بر پراش. در ادامه این دو روش توضیح داده می‌شوند.

۲-۲-۱- روش‌های مبتنی بر آزادسازی تنش

هنگامی در یک جسم، تنش پسماند وجود دارد با ایجاد برش در آن جسم، تنش‌های پسماند آزاد شده و جسم تغییر شکل می‌یابد. اساس بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند همین امر می‌باشد. این روش‌ها چون همگی نیاز به ایجاد برش و برداشتن یک لایه از جسم را دارند به همین جهت به آن‌ها روش‌های مخرب اندازه‌گیری تنش پسماند می‌گویند.

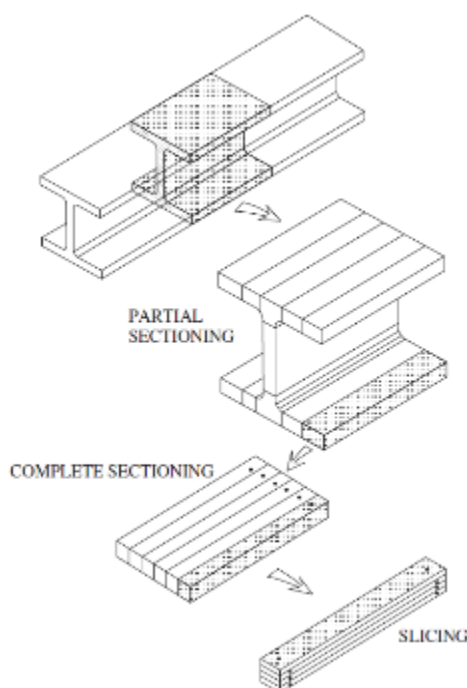
برای بعضی از نمونه‌های مشخص رابطه بین جابجایی/تنش به صورت تحلیلی تعیین می‌شود و برای بسیاری دیگر از نمونه‌ها این رابطه توسط روش المان محدود کالیبره می‌گردد. در همه موارد، یافتن رابطه بین جابجایی/تنش بسیار دشوار می‌باشد زیرا در همه روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، برداشت ماده از یک ناحیه صورت می‌گیرد و اندازه‌گیری تنش در یک ناحیه دیگر و همین امر روابط بین جابجایی با تنش را بسیار پیچیده می‌کند.

روش splitting تعدادی کننده تغییر شکل ایجاد شده در موادی است که در اثر تنش پسماند ترک در آن‌ها ایجاد شده و رشد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، یک برش عمیق در نمونه ایجاد می‌شود و بسته شدن یا باز شدن شکاف بیانگر علامت تنش و مقدار تقریبی بزرگی تنش پسماند است. از این روش می‌توان به عنوان یک تست کیفی بسیار سریع جهت اطلاع از علامت و میزان تنش پسماند در قطعه پس از ساخت استفاده کرد. در شکل ۲-۳-ب طریقه دیگر انجام روش splitting که برای لوله‌های جدار نازک (خصوصاً در مبدل‌های حرارتی) مورد استفاده قرار می‌گیرد نمایش داده شده است. در این حالت با اندازه‌گیری تغییر شکل و انحناى لوله، میزان تنش پسماند محاسبه می‌شود. این روش به همین جهت curvature method نامیده می‌شود.



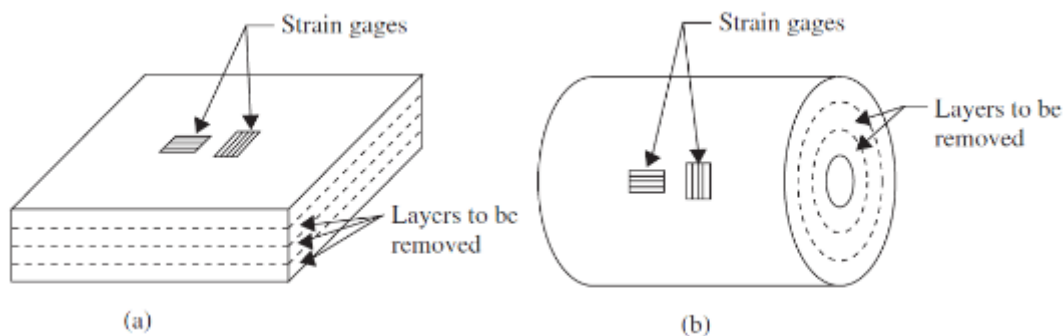
شکل ۲-۳: روش splitting برای (a) میل و (b) لوله [۱]

روش مقطع زدن با چندین روش دیگر ترکیب می‌شود تا بتوان تنش پسماند را در محل مناسب اندازه‌گیری کرد. این روش برای هر دو دسته روش‌های مبتنی بر آسایش تنش و روش‌های مبتنی بر پراش به کار می‌رود. برای نمونه در شکل زیر، روش مقطع زدن برای اندازه‌گیری تنش پسماند در یک بخش مشخص از یک تیر I شکل، به کار رفته است.



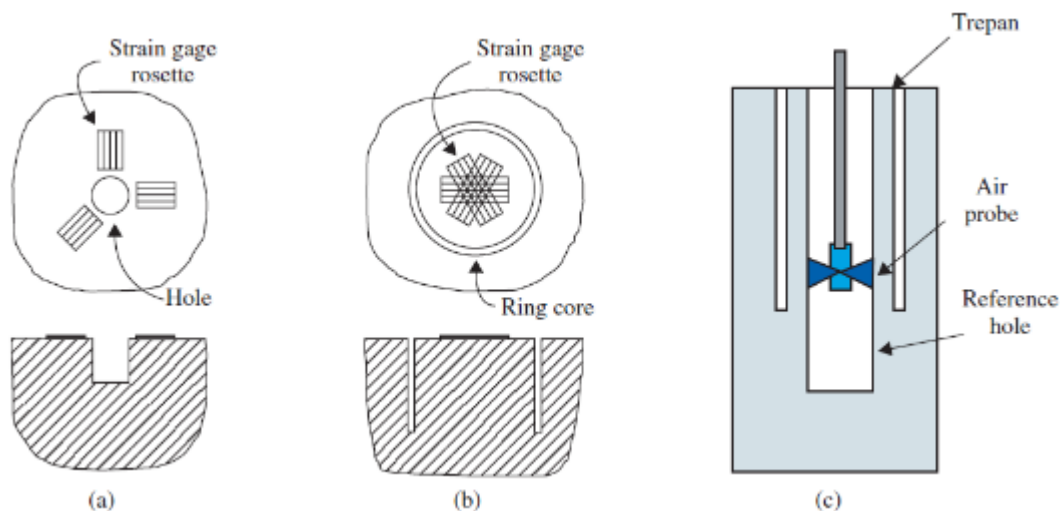
شکل ۲-۴: روش مقطع زدن برای اندازه‌گیری تنش پسماند در یک ناحیه مشخص [۱]

در روش لایه‌برداری با مشاهده جابجایی ایجاد شده در اثر برداشتن لایه‌های مواد، تنش پسماند محاسبه می‌شود. این روش برای صفحات تخت و قطعات استوانه‌ای که در آن‌ها تنش پسماند در عمق متغیر است و در هر صفحه تنش پسماند تقریباً یکنواخت است، بسیار مناسب می‌باشد. در شکل زیر برای دو نمونه صفحه تخت و یک استوانه این روش تشریح شده است. برای مثال، در نمونه تخت کرنش‌سنج‌ها بر روی سطح بالایی نصب شده و از لایه‌های زیرین به تناوب لایه برداری صورت می‌پذیرد. در نمونه استوانه‌ای نیز از شعاع داخلی لایه برداری صورت می‌پذیرد.



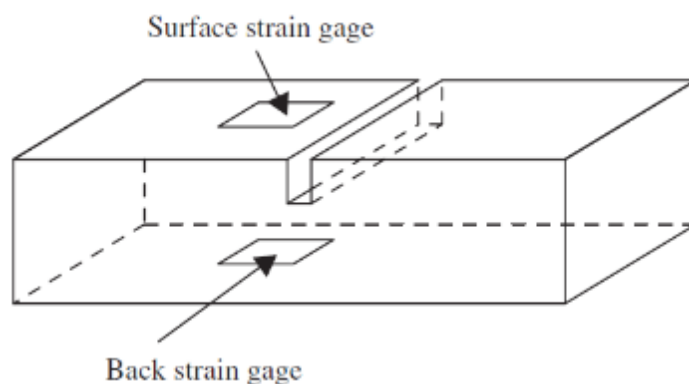
شکل ۲-۵: روش لایه برداری (a) از یک سطح تخت و (b) از یک استوانه [۱]

روش سوراخکاری بیشترین کاربرد را در بین روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند دارد. در این روش یک سوراخ کوچک در سطح جسم حفر می‌شود و تغییر شکل‌های اطراف سوراخ با استفاده از کرنش‌سنج (اخیراً به وسیله تجهیزات نوری) اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۲-۶-الف روش سوراخکاری نمایش داده شده است. این روش بسیار ارزان، در دسترس، مطمئن و نسبتاً دقیق است و در استاندارد ASTM E837 طبقه استفاده از آن تدوین شده است. در روشی مشابه با روش سوراخکاری، در روش Ring Core کرنش‌سنج در مرکز قرار گرفته و یک شیار استوانه‌ای شکل در ماده ایجاد می‌شود. با این روش کرنش سطحی بزرگتری ایجاد می‌شود و در نتیجه می‌توان تنش‌های پسماند با مقدار بالاتر را نیز با این روش اندازه‌گیری کرد (با دقت بالا). البته این روش خرابی بیشتری ایجاد می‌کند و اعمال آن دشوارتر است. روش سوراخکاری عمیق نیز ترکیبی از دو روش سوراخکاری و Ring Core است که در آن ابتدا یک سوراخ در ماده ایجاد شده و سپس تغییرات قطر این سوراخ در اثر ایجاد یک شیار استوانه‌ای در اطراف آن اندازه‌گیری می‌شود و با توجه به تغییرات صورت پذیرفته تنش پسماند در عمق ماده اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۲-۶: روش‌های سوراخکاری (a) روش سوراخکاری مرکزی، (b) روش ring-core و (c) روش سوراخکاری عمیق [۱]

روش slitting که در شکل ۷-۲ نمایش داده شده است نیز به لحاظ محاسباتی مشابه با روش سوراخ کاری است اما در اینجا به جای سوراخ، یک شیار عمیق و سرتاسری در قطعه ایجاد می‌شود. این روش را Crack Compliance Method نیز می‌نامند.



شکل ۷-۲: روش slitting برای اندازه‌گیری تنش پسماند [۱]

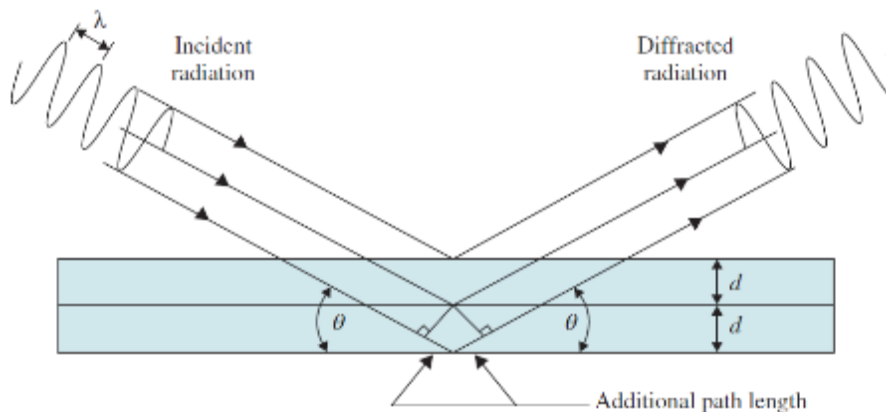
روش دیگری که نسبت به روش‌های قبلی نسبتاً جدیدتر است، روش کانتور می‌باشد که در آن ابتدا با EDM یک برش سراسری در جسم ایجاد می‌کنند و سپس تغییرات مختصات سطح پس از برش با لیزر اندازه‌گیری شده و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود، تنشی که لازم است که سطح تغییر شکل یافته را به جای اولیه خود برگرداند را محاسبه می‌کنند. در ادامه این فصل انواع روش‌های مخرب اندازه‌گیری تنش پسماند که همگی بر مبنای آزادسازی تنش در اثر ایجاد حذف بخشی از ماده هستند، به تفصیل تشریح خواهد شد.

۲-۲-۲- روش‌های مبتنی بر پراش اشعه پراش

روش‌های مبتنی بر پراش، روش‌های غیر مخربی هستند که در آن‌ها با اندازه‌گیری فاصله بین اتم‌ها، تنش‌های پسماند محاسبه می‌شوند. تحت اثر تنش‌های اعمالی یا تنش پسماند فاصله بین اتم‌ها در مواد پلی کریستالی تغییر می‌کند که با اندازه‌گیری این تغییرات، می‌توان مقدار و جهت تنش پسماند را به دست آورد. در این روش‌ها تشعشعات الکترومغناطیسی به سمت نمونه تابانده می‌شوند و نمونه آن‌ها را جذب و سپس با همان فرکانس بازتابش می‌دهد. پرقدرت‌ترین تشعشع باز تابش داده شده در زاویه‌ای است که با قانون Bragg محاسبه می‌شود. اساس کار محاسبات تنش پسماند این اشعه می‌باشد.

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (۱-۲)$$

که در این رابطه n یک عدد صحیح، λ طول موج تشعشع الکترومغناطیسی، d فاصله بین صفحات انکسار (فاصله بین صفحات اتمی) و θ زاویه Bragg است.



شکل ۲-۸: انعکاس تشعشعات داخل یک ساختار کریستالی [۱]

ویژگی مهم روش‌های مبتنی بر پراش، این است که این روش‌ها مقدار مطلق تنش را نتیجه می‌دهند و به همین جهت می‌توان آن‌ها را برای اندازه‌گیری تنش اعمالی و تنش پسماند استفاده کرد. این در حالی است که کرنش‌سنج‌ها تنها اختلاف کرنش را نشان می‌دهند. سه روش مهم در این دسته عبارتند از:

- پراش اشعه ایکس: (X-Ray Diffraction) یک روش سطحی محدود با قابلیت نفوذ چند صد میکرون
- پراش سنکروترون: (Synchrotron Diffraction) همانند پراش اشعه ایکس اما با اشعه بسیار قوی‌تر و در نتیجه عمق نفوذ بسیار بالاتر - در حدود چند میلی‌متر
- پراش نوترون: (Neutron Diffraction) روشی مطمئن با قابلیت اندازه‌گیری در جهت ضخامت ماده (چندین سانتی‌متر). اجرای این روش به یک منبع نوترونی (مانند یک رآکتور هسته‌ای) نیاز دارد.

۳-۲-۲- روش‌های دیگر

اساس کار این روش‌ها، مبتنی بر آزادسازی تنش و پراش یک اشعه پرنرژی نیست. این روش‌ها نیز همگی غیرمخرب هستند و عموماً در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند و برخی از آن‌ها در حال توسعه و تحقیق هستند. این روش‌ها عبارتند از:

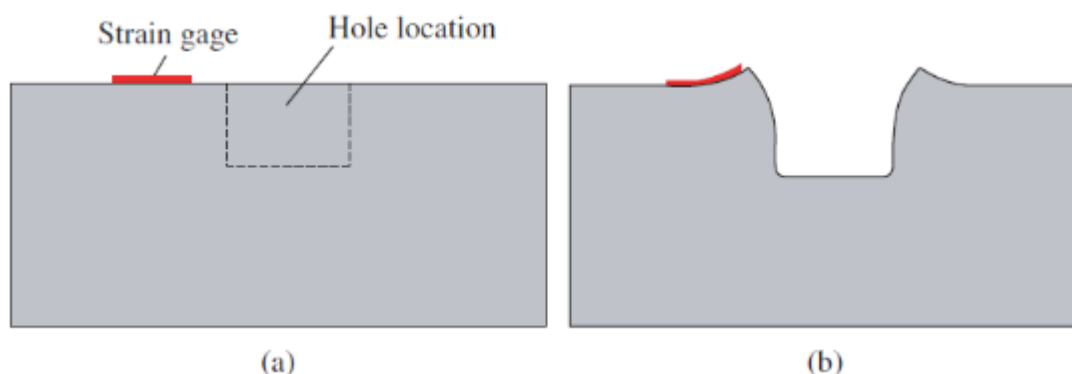
- **آلتراسونیک:** تغییر در سرعت امواج آلتراسونیک در اثر وجود تنش پسماند
- **نانونفوذ^۲:** نفوذ یک نشانگر در ابعاد چند صد نانومتر و محاسبه تغییرات در سختی نمونه در اثر وجود تنش پسماند
- **فتوالاستیسیت:** تغییر در نور پلاریزه شده تابانده شده به اجسام شفاف تحت اثر وجود تنش پسماند
- **روش مغناطیسی:** تغییر در خواص مغناطیسی مواد به سبب حضور تنش پسماند

^۲ Nanoindentation

۲-۳- روش سوراخکاری مرکزی

۲-۳-۱- کلیات روش سوراخکاری مرکزی

روش سوراخکاری مرکزی بر کرنش آزاد شده حین آزادسازی تنش پسماند حین فرایند سوراخکاری استوار است. تنش‌های پسماند همیشه در تعادل هستند به همین جهت با حذف بخشی از ماده که تنش پسماند دارد باید توزیع تنش به صورتی تغییر کند که همچنان در تعادل باقی بماند. کرنش‌های سطحی معمولاً با استفاده از یک کرنش‌سنج rosette که مرکز آن در مرکز سوراخ است، اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از سه کرنش‌سنج می‌توان تنش‌ها در دو جهت را محاسبه کرد (i.e. σ_{xx} , σ_{yy} and σ_{xy}). ابعاد استاندارد کرنش‌سنج برای قطر سوراخ‌های ۱ mm، ۲ mm و ۴ mm موجود است که به ترتیب قادر به محاسبه تنش پسماند تا عمق‌های ۰/۵ mm، ۱ mm و ۲ mm است. در شکل زیر اعوجاج به وجود آمده در اثر ایجاد سوراخ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۹: شماتیکی از جابجایی ایجاد شده در اثر سوراخکاری نمونه حاوی تنش پسماند [۱]

روش سوراخکاری مرکزی با کرنش‌سنج تکنیک نیمه مخرب و به دلیل تأثیر اندک سوراخ کم‌عمق بر رفتار سازه روشی غیر مخرب است که برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از کرنش آزاد شده به کار می‌رود. به طور خلاصه می‌توان این روش را به شش مرحله اصلی تقسیم کرد.

۱- نصب کرنش‌سنج سه‌المانی بر روی قطعه کار و در جایی که تنش پسماند باید اندازه‌گیری گردد.

۲- سیم‌بندی کرنش‌سنج‌ها و ارتباط دادن آن با وسیله نمایشگر کرنش.

۳- نصب پوش راهنمای دقیق سوراخکاری در مرکز دستگاه کرنش‌سنج.

۴- ایجاد سوراخ کوچک بر روی قطعه کار بعد از صفر کردن و بالانس کردن دستگاه.

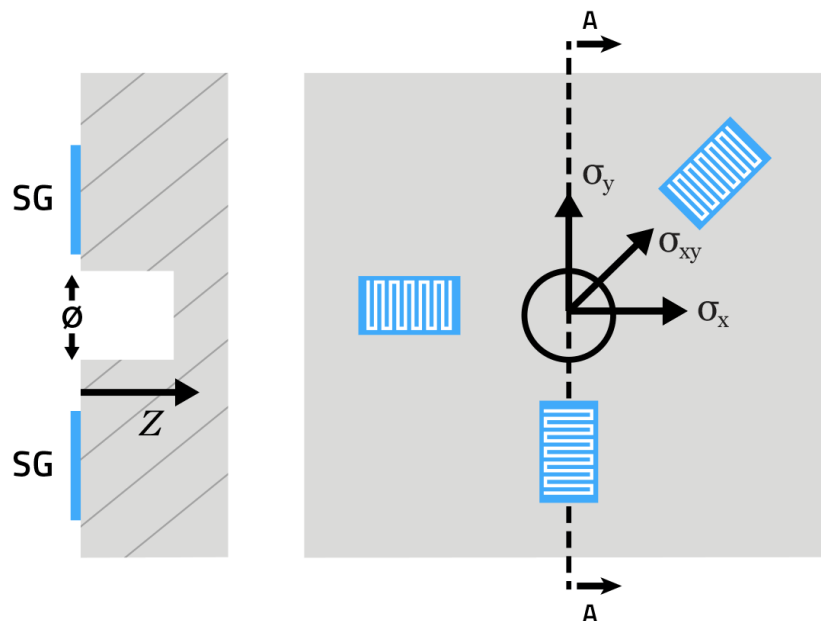
۵- خواندن کرنش آزاد شده مربوط به تنش پسماند داخل قطعه کار.

۶- استفاده از روابط موجود و بدست آوردن ماکزیمم تنش و زاویه آن نسبت به گج‌های کرنش‌سنج

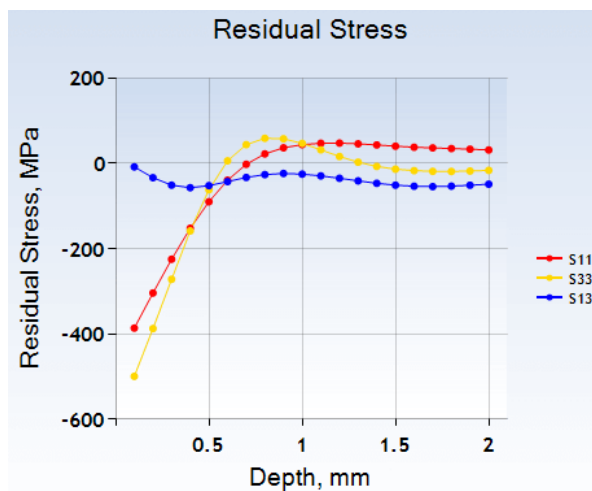
خطا در اندازه‌گیری قطر و عمق سوراخ، هم مرکز نبودن کرنش‌سنج‌ها با سوراخ، زبری سطح، مسطح نبودن سطح، آماده‌سازی نامناسب نمونه‌ها و دقت پایین کرنش‌سنج‌ها سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری تنش پسماند می‌شود. با این وجود این روش

بیشترین کاربرد را برای اندازه‌گیری تنش پسماند به سبب ارزان بودن، سریع بودن و قابل دسترس بودن برای همگان چه در محیط آزمایشگاهی و چه در محیط صنعتی دارد.

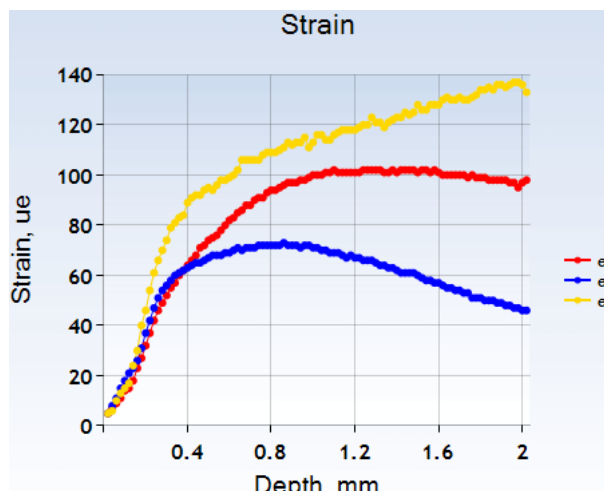
کرنش‌سنج‌ها در اطراف سوراخ در زوایای صفر، ۹۰ و ۱۳۵ درجه نسبت به افق قرار می‌گیرند. شماره‌بندی کرنش‌سنج‌ها به صورت پاد ساعتگرد از ۱ تا ۳ است. فرض می‌شود که زاویه کرنش‌سنج ۱ با جهت تنش اصلی ماکزیمم برابر β باشد در این صورت این زاویه با کرنش‌سنج ۲ و ۳ به ترتیب $\beta - ۹۰$ و $\beta - ۴۵$ خواهد بود. قطر سوراخ D_0 و قطر متوسط دایره کرنش‌سنج‌ها برابر D می‌باشد. بین نزدیک‌ترین مکان کرنش‌سنج‌ها به لبه سوراخ حداقل باید 0.3 mm فاصله باشد که این حداکثر قطر سوراخ D_0 را نسبت به D تعیین می‌کند. حداقل قطر سوراخ نیز برابر ۶۰٪ قطر حداکثری سوراخ می‌باشد. با توجه به اینکه با افزایش D_0 دقت کرنش‌سنجی با نسبت $(D_0/D)^2$ افزایش می‌یابد لذا حتی‌الامکان از سوراخ‌های با قطر بیشتر بایستی استفاده کرد. در این استاندارد ورق با ضخامت کمتر از $0.4 D$ ورق نازک و بزرگ‌تر از $1/2 D$ ورق ضخیم در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که ورق نازک باشد، سوراخ راه به در زده شده و کرنش‌ها یکبار محاسبه می‌شوند ولی در ورق ضخیم هر بار تا عمق $h=0.05D$ و تا عمق نهایی $0.4 D$ (مرحله ۸) سوراخ زده شده و در هر مرحله کرنش‌ها و تنش‌ها محاسبه می‌شود. برای ورق به ضخامت بین $0.4 D$ و $1/2 D$ استاندارد روشی را بیان نکرده است. یک نمونه از کرنش‌های اندازه‌گیری شده و تنش‌های پسماند به دست آمده از محاسبات در شکل ۲-۱۱ آورده شده است.



شکل ۲-۱۰: موقعیت کرنش‌سنج‌ها نسبت به سوراخ مرکزی [۳]



تنش پسماند پس از انجام محاسبات



کرنش اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج

شکل ۲- ۱۱: یک نمونه از کرنش اندازه‌گیری شده و تنش‌های پسماند به دست آمده از محاسبات [۳]

مزایای روش سوراخکاری مرکزی

- یک روش نیمه مخرب است و امکان اندازه‌گیری مکرر تنش پسماند در طول عمر سازه وجود دارد
- اندازه‌گیری به صورت آزمایشگاهی و همچنین در محل وجود دارد
- قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در دو جهت (e.g. σ_{xx} , σ_{yy} and τ_{xy}) و همچنین گرادینان تنش را دارد
- قابلیت استفاده برای محدوده وسیعی از مواد شامل مواد فلزی و غیر فلزی را دارد.
- نسبت به ابعاد و ساختار دانه حساسیت ندارد
- دقت نرمال آن برای آلومینیوم ۱۰ MPa، فولاد ۳۰ MPa و تیتانیوم ۱۵ MPa است.
- روشی بسیار سریع است و اعمال آن بسیار ساده است و در نتیجه نسبتاً ارزان می‌باشد
- برای اندازه‌گیری تنش پسماند نزدیک سطح ناشی از فرایندهای بهبود سطح مواد، بسیار مفید است.

معایب روش سوراخکاری مرکزی

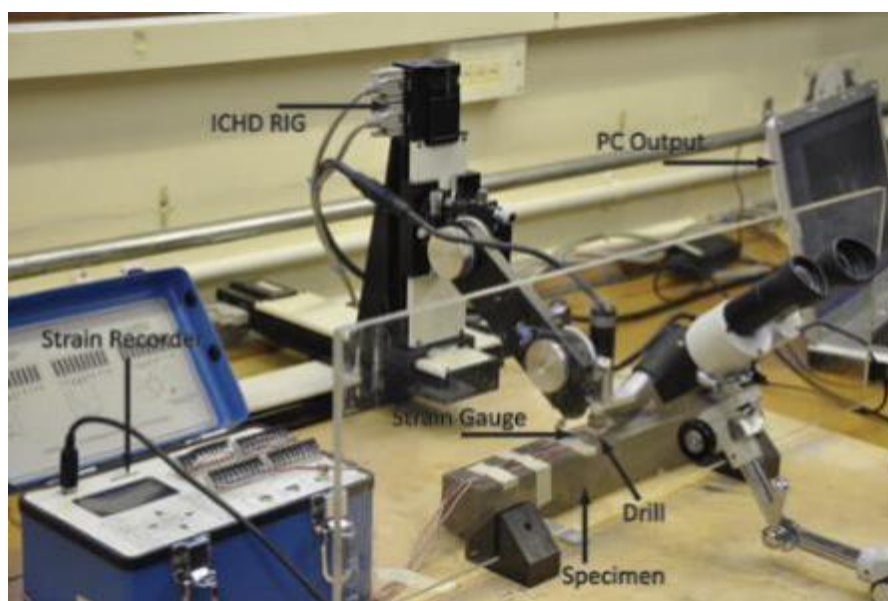
- یک روش نیمه مخرب است و نیاز است که سوراخ‌های ایجاد پر شوند.
- بیشینه عمق اندازه‌گیری تنش پسماند در این روش ۲ mm است
- قابلیت اندازه‌گیری تنش در راستای عمق σ_{zz} را ندارد.
- برای تنش‌های پسماندی که بزرگ‌تر از ۸۰٪ تنش تسلیم ماده هستند، دقت پایینی دارد که دلیل آن plastic relaxation می‌باشد.
- یک سطح نسبتاً صاف برای اتصال کرنش‌سنج‌ها نیاز دارد و در نتیجه امکان اعمال آن روی سطوح پیچیده محدود است.
- کرنش‌سنج‌ها نسبت به نویز حساس بوده و برای نصب آن‌ها آماده‌سازی سطح نیاز است
- بسیار متکی به منحنی‌های پاسخ کرنش‌سنج است
- عدم دقت به دلیل اینکه تنش‌ها در عمق آزاد می‌شوند اما کرنش‌ها در سطح اندازه‌گیری می‌شوند
- بسیار حساس به هم مرکز نبودن کرنش‌سنج‌ها و سوراخ ایجاد شده

۲-۳-۲- تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی

شکل زیر دو نمونه از دستگاه روش سوراخ مرکزی را برای محاسبه تنش پسماند نشان می‌دهد. در شکل ۲-۱۳ نیز تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی نمایش داده شده است.



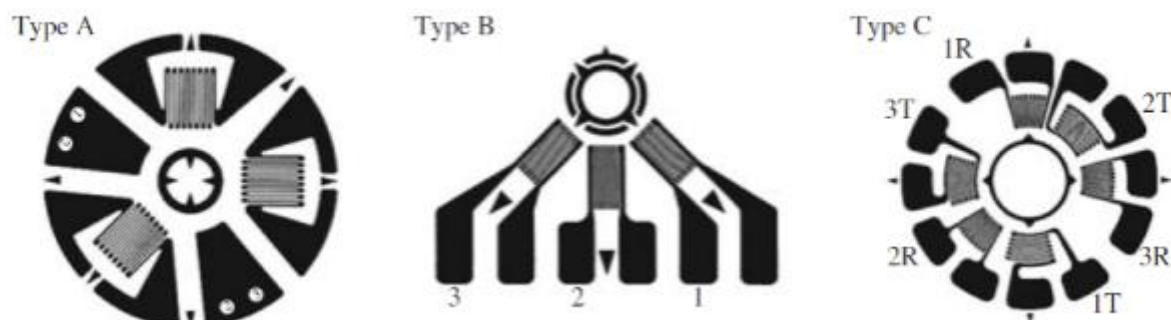
شکل ۲-۱۲: دو نمونه از دستگاه‌های ایجاد سوراخ در روش سوراخکاری مرکزی [۱]



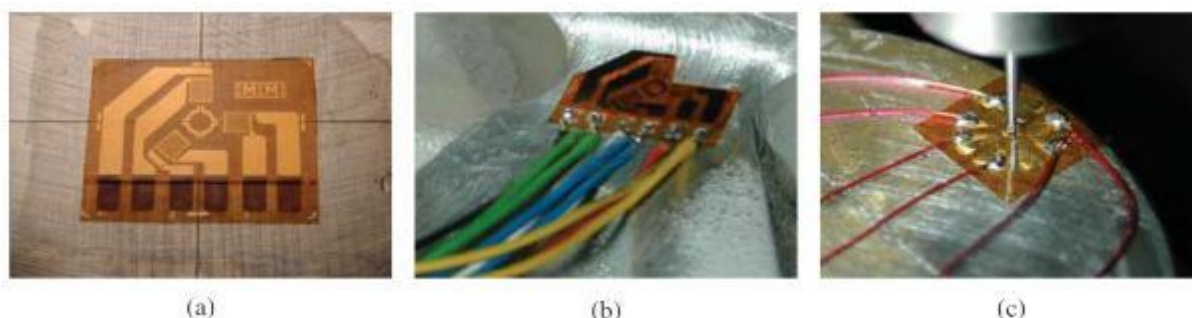
شکل ۲-۱۳: مجموعه تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی

در چند دهه اخیر کرنش‌سنج‌های مخصوصی برای روش سوراخکاری مرکزی تولید می‌شوند که با استفاده از آن‌ها دیگر به تنظیم محل سوراخ و محل کرنش‌سنج‌ها نیازی نیست. در این کرنش‌سنج‌ها محل سوراخ کاملاً مشخص است. نوع A در شکل ۲-۱۴ پرکاربردترین نوع کرنش‌سنج است. نوع B برای حالتی مناسب است که محل سوراخ در نزدیکی یک برآمدگی یا لبه است و در نتیجه امکان نصب کرنش‌سنج نوع A وجود ندارد. نوع C که گران‌تر از دو نوع

دیگر است برای موادی که ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند مانند پلاستیک‌ها و یا برای مقادیر کم تنش پسماند کاربرد دارد. با استفاده از این نوع کرنش‌سنج‌ها، تأثیر افزایش دما ناشی از سوراخکاری و در نتیجه کرنش حرارتی در داده‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج بسیار کم می‌شود. مشخصات این سه نوع کرنش‌سنج در استاندارد ASTM E837 [۴] آمده است. در شکل ۲-۱۵ نیز نمایی از اتصال کرنش‌سنج‌ها به نمونه و سوراخکاری آن آورده شده است.

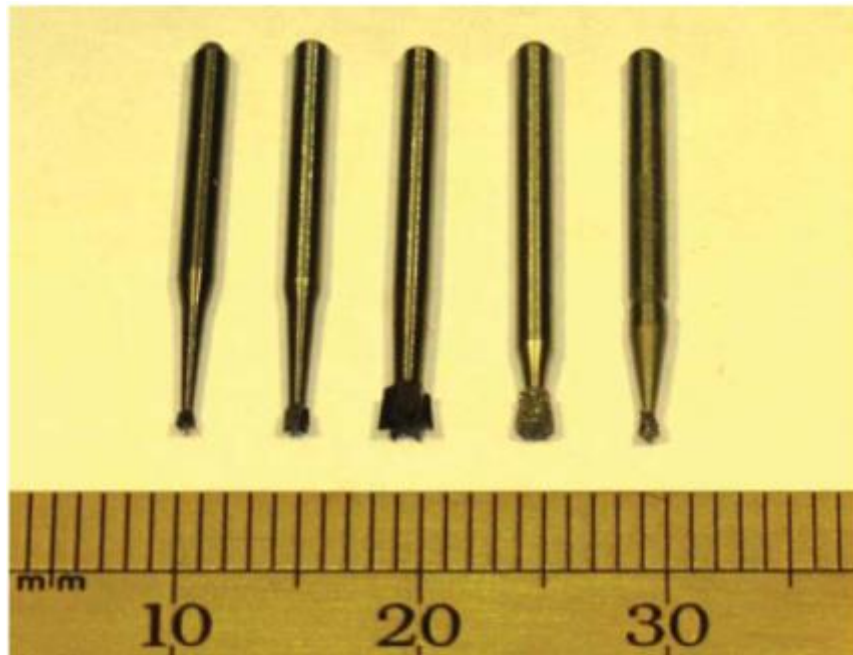


شکل ۲-۱۴: انواع مختلف کرنش‌سنج برای استفاده در سوراخکاری مرکزی [۱]



شکل ۲-۱۵: چپ: اتصال کرنش‌سنج به نمونه، وسط: اتصال سیم‌ها به کرنش‌سنج و راست: ایجاد سوراخ با دریل مخصوص [۱]

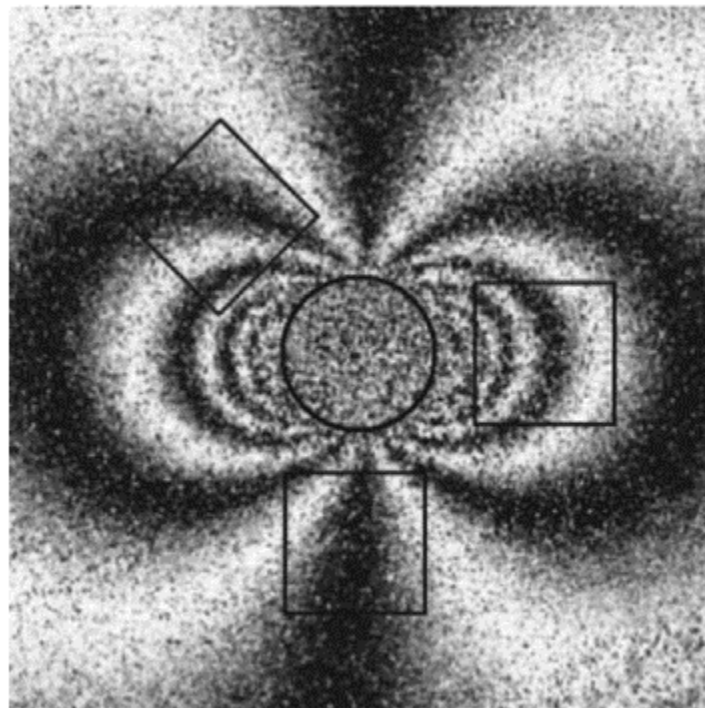
در شکل ۲-۱۵ برخی از مته‌های استفاده شده برای روش سوراخکاری مرکزی نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که استفاده از برخی از آن‌ها، نیاز به مهارت بالایی دارد و معمولاً از مته سمت چپ استفاده می‌شود.



شکل ۲-۱۶: مته‌های استفاده شده برای ایجاد سوراخ در روش سوراخکاری مرکزی [۱]

۳-۳-۲- تکنیک اندازه‌گیری نوری

در حال حاضر استفاده از تصاویر دیجیتال برای اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در فرایند سوراخکاری بسیار رواج پیدا کرده است. مزیت استفاده از این روش، امکان اندازه‌گیری کرنش در یک دامنه وسیع و در جهات مختلف است. در شکل ۲-۱۶ کادرهای مربعی بیانگر موقعیت‌هایی است که توسط کرنش‌سنج پوشش داده می‌شود که در قیاس با کل تصویر، بسیار کوچک می‌باشد.



شکل ۲-۱۷: الگوی ایجاد شده با استفاده از تصاویر دیجیتالی در اثر ایجاد سوراخ در نمونه [۱]

هم اکنون سه روش اصلی برای اندازه‌گیری کرنش با استفاده از تصاویر نوری وجود دارد که عبارتند از:

- Moir'e Interferometry
- Holographic Interferometry
- Digital Image Correlation

البته لازم به ذکر است که روش Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) که بهبود یافته روش Holographic Interferometry است، در حال حاضر کاربرد بسیار گسترده‌تری دارد. در این روش با استفاده از یک دوربین با دقت بالا، تصاویر به صورت زنده ثبت می‌شوند. تصویر ۲-۱۶ یک نمونه از تصاویر روش ESPI است. در جدول ۲-۲ دو روش اندازه‌گیری کرنش با استفاده از کرنش‌سنج و استفاده از روش‌های اپتیکی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در جدول ۲-۲ نیز خصوصیات انواع روش‌های اپتیکی اندازه‌گیری کرنش ارائه شده است.

جدول ۲-۱: مقایسه اندازه‌گیری کرنش با استفاده از کرنش‌سنج و استفاده از روش‌های اپتیکی [۱]

Strain Gage Measurements	Optical Measurements
● Moderate equipment cost, high per-measurement cost ● Significant preparation and measurement time ● Small number of very accurate and reliable measurements ● Stress calculations are relatively compact ● Modest capabilities for data averaging and self-consistency checking ● Relatively rugged, suitable for field use ● Sensitive to hole-eccentricity errors	● High equipment cost, moderate per-measurement cost ● Preparation and measurement time can be short ● Large number of moderately accurate measurements available for averaging ● Stress calculations often quite large ● Extensive capabilities for data averaging and self-consistency checking ● Less rugged, more suited to lab use ● Hole center can be identified accurately

جدول ۲-۲: خصوصیات انواع روش‌های اپتیکی اندازه‌گیری کرنش [۱]

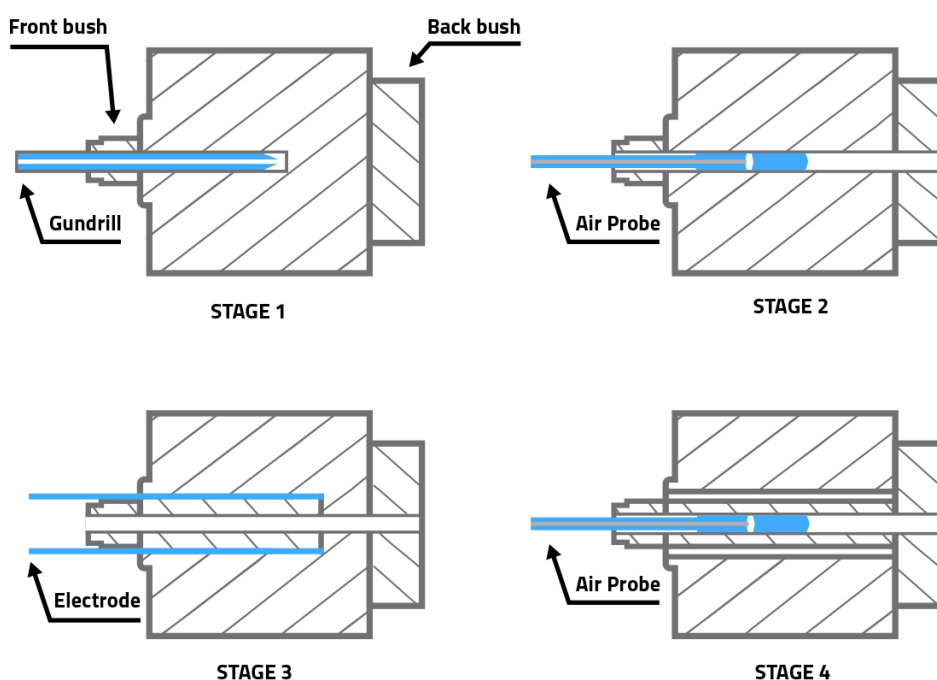
Method	Accuracy*	Advantages	Limitations
Holographic interferometry or ESPI	5 to 15% [21-24,42,111-115,117]	● Strain gages and milling guide avoided ● Applicable to curved and/or rough surfaces ● Equipment and software commercially available specifically for hole drilling as well as other measurement purposes	● Test setup needs interferometric stability
Moire interferometry	5 to 15% [57,116]	● Strain gages and milling guide avoided ● Equipment and software commercially available for general purpose measurements	● Test setup needs interferometric stability ● Requires installation of a grating
Digital image correlation (macro)	10 to 20% [76-78]	● Strain gages and milling guide avoided ● Applicable to curved and/or rough surfaces ● Interferometric stability not needed ● Equipment and software commercially available for general purpose measurements	● Deformation measurements not as precise as for interferometric methods
Digital image correlation [†] (micro-hole or slot)	20 to 40% [81,85,117]	● Micro-scale measurements ● Applicable to microscopically curved and/or rough surfaces ● Software commercially available for general purpose measurements	● Requires scanning electron microscope with focused ion beam

۲-۴- روش سوراخکاری عمیق

هنگامی که نیاز به اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در عمق یک قطعه را داریم امکان استفاده از روش سوراخکاری مرکزی وجود ندارد زیرا عمق مؤثر اندازه‌گیری تنش در این روش تنها چند میلی‌متر است. برای این منظور روش دیگری به نام سوراخکاری عمیق گسترش داده شده است. مراحل انجام روش سوراخکاری عمیق به شرح زیر است:

- ۱- بوش‌های مرجع به قطعه وصل شده و یک سوراخ مرجع عمیق در داخل قطعه ایجاد می‌شود.
- ۲- قطر سوراخ مرجع در طول ضخامت و همچنین در بوش‌ها با دقت و در زوایای مختلف اندازه‌گیری می‌گردد.
- ۳- یک سیلندر از ماده با ضخامت محدود و مشخص به صورتی که سوراخ در مراکز آن باشد، برداشته می‌شود. این سوراخ معمولاً توسط electro discharge machining انجام می‌شود.
- ۴- قطر سوراخ مرجع دوباره اندازه‌گیری می‌شود. این کار در طول ضخامت و بوش‌ها همانند مرحله دوم انجام می‌پذیرد.
- ۵- قطر سوراخ مرجع را قبل و بعد از برداشت یک استوانه از ماده (مرحله ۳) با یکدیگر مقایسه کرده و تنش‌های پسماند به صورت تابعی از ضخامت به دست می‌آید.

مراحل ۱ تا ۴ در شکل ۲-۱۸ به تصویر درآمده است. در شکل ۲-۱۹ نیز یک نمونه از اعمال این روش به یک جوش چند پایه با ضخامت بسیار بالا آورده شده است. در این شکل هر دو سوراخ مرکزی و استوانه‌ای (سیلندری) نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۸: مراحل انجام روش سوراخکاری مرکزی [۵]



شکل ۲-۱۹: روش سوراخکاری عمیق برای جوش چند پاسه [۵]

اگر تنش پسماند با اندازه بالا در سازه حضور داشته باشد، روش سوراخکاری عمیق مرحله‌ای باید انجام شود و در غیر این صورت دقت جواب‌ها مناسب نمی‌باشد. در روش سوراخکاری عمیق مرحله‌ای، مرحله ۳ به صورت تدریجی انجام می‌شود و همزمان قطر سوراخ مرجع اندازه‌گیری می‌شود. مراحل ۳ و ۴ به تناوب تکرار می‌شوند تا زمانی که کل عمق قطعه سوراخ (استوانه‌ای) شود. سپس با داده‌های به دست آمده، تنش‌های پسماند محاسبه خواهند شد. در روش سوراخکاری عمیق از سه قطر مختلف مته با توجه به هندسه و پروفیل تنش پسماند مورد انتظار استفاده می‌شود که در جدول زیر نمایش داده شده است. تجهیزات روش سوراخکاری عمیق در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است.

جدول ۲-۳: قطر سوراخ‌های ایجاد شده در روش سوراخکاری عمیق [۱]

شماره	قطر سوراخ مرجع	قطر سوراخ استوانه‌ای
۱	1.5 mm	5 mm
۲	3 mm	10 mm
۳	5 mm	17 mm



شکل ۲-۲۰: نمونه دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند با روش سوراخکاری عمیق [۵]

مزایای روش سوراخکاری عمیق

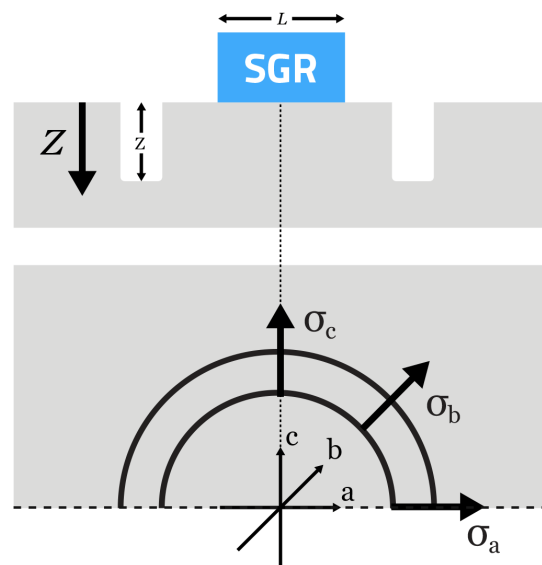
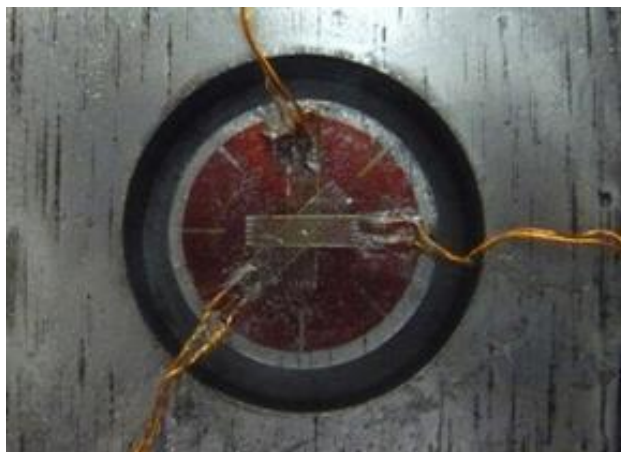
- یک روش نیمه مخرب است و امکان اندازه‌گیری مکرر تنش پسماند در طول عمر سازه وجود دارد.
- قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند تا عمق ۷۵۰ mm را دارد.
- قابلیت اندازه‌گیری به صورت آزمایشگاهی و همچنین در محل وجود دارد.
- قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در دو جهت (e.g. σ_{xx} , σ_{yy} and τ_{xy}) و همچنین گرادیان تنش را دارد. σ_{zz} را نیز می‌توان با این روش اندازه‌گیری کرد اما دقت پایینی دارد و بسیار مشکل است.
- قابلیت استفاده برای محدوده وسیعی از مواد شامل مواد فلزی و غیر فلزی را دارد.
- نسبت به ابعاد و ساختار دانه حساسیت ندارد.
- نسبت به پرداخت سطح غیر حساس است.
- دقت نرمال آن برای آلومینیوم ۱۰ MPa، فولاد ۳۰ MPa و تیتانیوم ۱۵ MPa است.
- با توجه به حجم اطلاعات خروجی، روشی بسیار سریع است.
- قابلیت استفاده برای سازه‌های ساده و پیچیده را دارا می‌باشد.
- تنش پسماند با مقدار زیاد را می‌توان با این روش اندازه‌گیری کرد.
- سیلندر بریده شده از آنجایی که عاری از تنش است، قابلیت استفاده برای تست مواد را دارد.

معایب روش سوراخکاری عمیق

- یک روش نیمه مخرب است و نیاز است که سوراخ‌های ایجاد شده پر شوند.
- برای قطعات با ضخامت کمتر از ۶ mm نمی‌توان از این روش استفاده کرد.

۵-۲- Ring Core روش

در این روش با ایجاد یک شیار دایروی در قطعه و قرار دادن کرنش سنج روی سطح قطعه و در مرکز شیار، مقادیر کرنش ثبت می‌گردد. پس از ثبت کرنش‌های آزاد شده حین فرایند، تنش‌های پسماند برای عمق‌های مختلف با توجه به ضرایب تبدیل به دست آمده از المان محدود محاسبه می‌شوند. معمولاً با یک شیار به قطر ۱۴ میلی‌متر، می‌توان تنش پسماند تا عمق ۵ میلی‌متر را اندازه‌گیری کرد، البته با استفاده از کرنش‌سنج‌های مختلف و هندسه‌های مختلف شیار امکان اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق‌های بالاتر امکان پذیر است. در گذشته این روش برای تنش‌های پسماند یکنواخت و تا عمق ۵ میلی‌متر و کمتر مورد استفاده قرار می‌گرفت اما به کمک دستاوردهای جدید در تکنیک‌های آنالیز داده‌ها و توسعه روش‌های ایجاد شیار، عمق بیشینه اندازه‌گیری تنش پسماند تا ۲۵ میلی‌متر افزایش یافته است. با ایجاد سوراخ به صورت گام به گام، کرنش‌ها در هر مرحله با روش Integral methods اندازه‌گیری می‌شوند. تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده با این روش در دو جهت (σ_{xx} , σ_{yy} and τ_{xy}) متوسط تنش‌های پسماند در دایره میانی شیار ایجاد شده است.



شکل ۲-۲۱: نمایی از روش Ring Core برای اندازه‌گیری تنش پسماند [۶]

مراحل انجام روش Ring Core به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- آماده‌سازی سطح نمونه در محل اندازه‌گیری تنش پسماند
- ۲- چسباندن کرنش سنج به سطح قطعه و اتصال سیم‌ها
- ۳- ضدآب یا احاطه کردن کرنش‌سنج‌ها برای اطمینان از عدم آسیب آن‌ها توسط سیال خنک‌کن EDM (در صورت ایجاد شیار توسط برش مکانیکی نیازی به این کار نیست)
- ۴- تنظیم کردن دستگاه ایجاد شیار با مرکز کرنش‌سنج
- ۵- ایجاد شیار دایروی در چندین گام
- ۶- اندازه‌گیری عمق شیار و ثبت داده‌های کرنش سنج در هر گام
- ۷- پس از پایان پروسه، اندازه‌گیری دوباره عمق و اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌های انجام شده برای عمق شیار

مزایای روش Ring Core

- یک روش نیمه مخرب است و امکان اندازه‌گیری مکرر تنش پسماند در طول عمر سازه وجود دارد
- اندازه‌گیری به صورت آزمایشگاهی و همچنین در محل وجود دارد
- قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در دو جهت (e.g. σ_{xx} , σ_{yy} and τ_{xy}) و همچنین گرادیان تنش را دارد
- قابلیت استفاده برای محدوده وسیعی از مواد شامل مواد فلزی و غیر فلزی را دارد.
- نسبت به ابعاد و ساختار دانه حساسیت ندارد
- دقت نرمال آن برای آلومینیوم ۱۰ MPa، فولاد ۳۰ MPa و تیتانیوم ۱۵ MPa است.
- روشی سریع است و اعمال آن ساده است
- برای عمق تا ۵ mm دقت بسیار خوبی دارد.
- با توجه به اینکه قادر به اندازه‌گیری تنش در عمق است، روشی بسیار رقابتی به لحاظ اقتصادی است.
- نسبت به هم مرکزی کرنش‌سنج و شیار استوانه‌ای حساس نیست

معایب روش Ring Core

- یک روش نیمه مخرب است و نیاز است که سوراخ‌های ایجاد پر شوند.
- بیشینه عمق اندازه‌گیری تنش پسماند در این روش معمولاً ۵ mm است البته تا ۲۵ mm را می‌توان با این روش اندازه‌گیری کرد اما بسیار دشوار است
- قابلیت اندازه‌گیری تنش در راستای عمق σ_{zz} را ندارد.
- یک سطح نسبتاً صاف برای اتصال کرنش‌سنج‌ها نیاز دارد و در نتیجه امکان اعمال آن روی سطوح پیچیده محدود است.
- کرنش‌سنج‌ها نسبت به نویز حساس بوده و برای نصب آن‌ها آماده‌سازی سطح نیاز است
- بسیار متکی به منحنی‌های پاسخ کرنش‌سنج است
- عدم دقت به دلیل اینکه تنش‌ها در عمق آزاد می‌شوند اما کرنش‌ها در سطح اندازه‌گیری می‌شوند

۶-۲- روش Sach's Boring

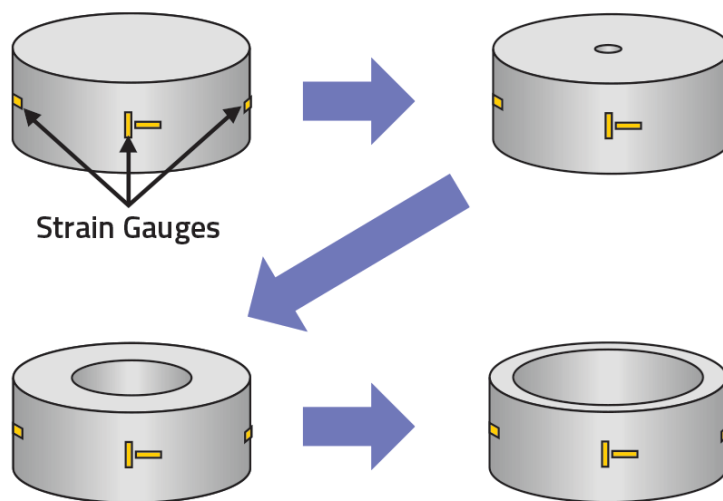
این روش به نام بنیان‌گذار آن، نام‌گذاری شده است. این روش برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات با تقارن محوری مورد استفاده قرار می‌گیرد و قادر به اندازه‌گیری تنش محیطی و محوری در این قطعات است [۷]. برای این منظور کرنش‌سنج‌ها در دو راستای محوری و محیطی روی قطعه نصب شده و سپس برداشت ماده آغاز می‌شود. برداشت ماده از سطح مخالف سطحی که کرنش‌سنج‌ها نصب شده‌اند، انجام می‌پذیرد. برای نمونه در شکل زیر از آنجایی که کرنش‌سنج‌ها روی سطح بیرونی استوانه

نصب شده‌اند، برداشت ماده از داخل قطعه و به صورت استوانه‌ای انجام می‌پذیرد. برداشت ماده تا زمانی که رهایش کرنش به اتمام نرسیده است باید ادامه یابد. برای دستیابی به گرادیان تنش مناسب بایستی ضخامت مراحل حذف ماده کمینه باشد و تعداد مراحل زیاد باشد.

این روش برای قطعات استوانه‌ای که تنش پسماند در آن‌ها تقارن محوری دارد، بیشترین کارایی را خواهد داشت. با این وجود اخیراً روش‌هایی برای استفاده از این روش برای قطعات با تنش پسماند بدون تقارن محوری نیز گسترش داده شده که با دقت بالایی تنش پسماند را اندازه‌گیری می‌کند [۸]. دقت اسمی روش Sachs Boring برای فولاد در حدود $\pm 45\text{MPa}$ است.

مراحل انجام روش Sachs Boring به شرح زیر است

- ۱- آماده‌سازی سطح قطعه برای اتصال کرنش‌سنج‌ها
- ۲- چسباندن کرنش‌سنج‌ها به قطعه کار
- ۳- هم‌مرکز کردن قطعه با ماشین ابزار
- ۴- سوراخ کردن یا برداشت ماده (شعاعی) در چندین گام
- ۵- اندازه‌گیری شعاع جدید و همچنین ثبت کرنش‌های اندازه‌گیری شده با کرنش‌سنج‌ها در هر گام
- ۶- آنالیز قطر سوراخ و داده‌های کرنش‌سنج‌ها و محاسبه تنش‌های پسماند



شکل ۲-۲: مراحل انجام روش Sachs Boring برای اندازه‌گیری تنش پسماند [۹]

مزایای روش Sachs Boring

- عمق اندازه‌گیری تنش پسماند تنها وابسته به ماشین ابزار استفاده شده است و اندازه‌گیری تنش در عمق‌های بالاتر از mm ۱۰۰ نیز امکان‌پذیر است.
- تنش در دو محور (e.g. $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} , $\tau_{\theta z}$) و همچنین گرادیان تنش با این روش قابل اندازه‌گیری است.
- قابلیت استفاده برای محدوده وسیعی از مواد شامل مواد فلزی و غیر فلزی را دارد.

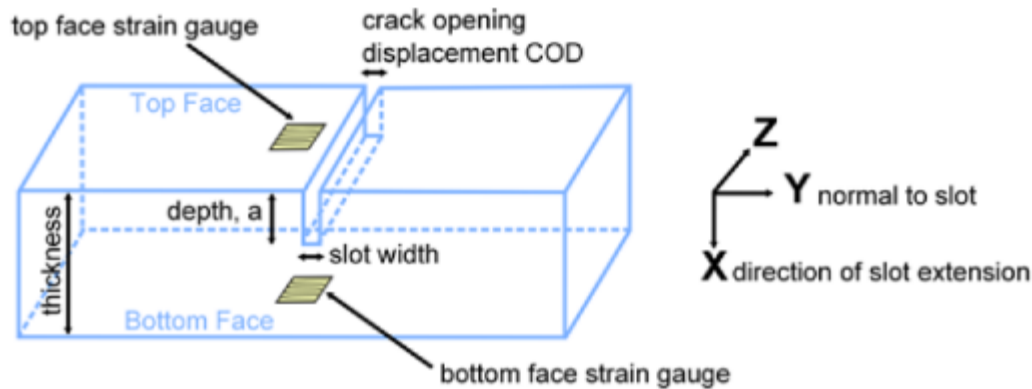
- نسبت به ابعاد و ساختار دانه حساسیت ندارد.
- دقت نرمال آن برای آلومینیوم ۱۰ MPa، فولاد ۴۵ MPa و تیتانیوم ۱۵ MPa است.
- روشی سریع و اعمال آن ساده است.
- با توجه به اینکه قادر به اندازه‌گیری تنش در عمق است، روشی بسیار رقابتی به لحاظ اقتصادی است.
- برای عمق تا ۵ mm حتی برای تنش‌های با مقدار بسیار زیاد نیز دقت بسیار خوبی دارد.

معایب روش Sachs Boring

- یک روش مخرب است
- اندازه‌گیری فقط در آزمایشگاه امکان پذیر است
- قابلیت اندازه‌گیری تنش در راستای عمق σ_{zz} را ندارد.
- کرنش‌سنج‌ها نسبت به نویز حساس بوده و برای نصب آن‌ها آماده‌سازی سطح نیاز است
- عدم دقت به دلیل اینکه تنش‌ها در عمق آزاد می‌شوند اما کرنش‌ها در سطح اندازه‌گیری می‌شوند
- تنها برای قطعات با تقارن محوری قابل استفاده است
- این روش برای قطعات استوانه‌ای که تنش پسماند در آن‌ها تقارن محوری دارد معمولاً استفاده می‌شود. با این وجود اخیراً روش‌هایی برای استفاده از این روش برای قطعات با تنش پسماند بدون تقارن محوری نیز گسترش داده شده که البته بسیار مشکل می‌باشند.

۷-۲- Slitting روش

روش Slitting یا Crack Compliance یک روش مخرب و بر مبنای آزادسازی کرنش است که قادر به اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح و عمق است. در این روش یک شکاف در مقطع جسم ایجاد می‌شود (معمولاً با wire-EDM) و کرنش سطح با استفاده از کرنش‌سنج‌های قرار گرفته در زیر شکاف یا نزدیک به شیار اندازه‌گیری می‌گردد. در این پروسه، عمق شکاف به تدریج افزایش یافته و کرنش در هر گام ثبت می‌شود. کرنش سطح با استفاده از ضرایبی که به صورت عددی محاسبه شده‌اند تبدیل به تنش پسماند می‌شود. معمولاً کرنش‌سنج قرار گرفته در زیر شکاف بالاترین اهمیت را داشته و برای اندازه‌گیری تنش پسماند در طول ضخامت مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود کرنش‌سنج تعبیه شده روی سطح اطلاعات دیگری درباره تنش‌های سطحی در چند گام اول ایجاد شکاف را ارائه می‌کنند. در شکل زیر محل تعبیه این کرنش‌سنج‌ها نمایش داده شده است.



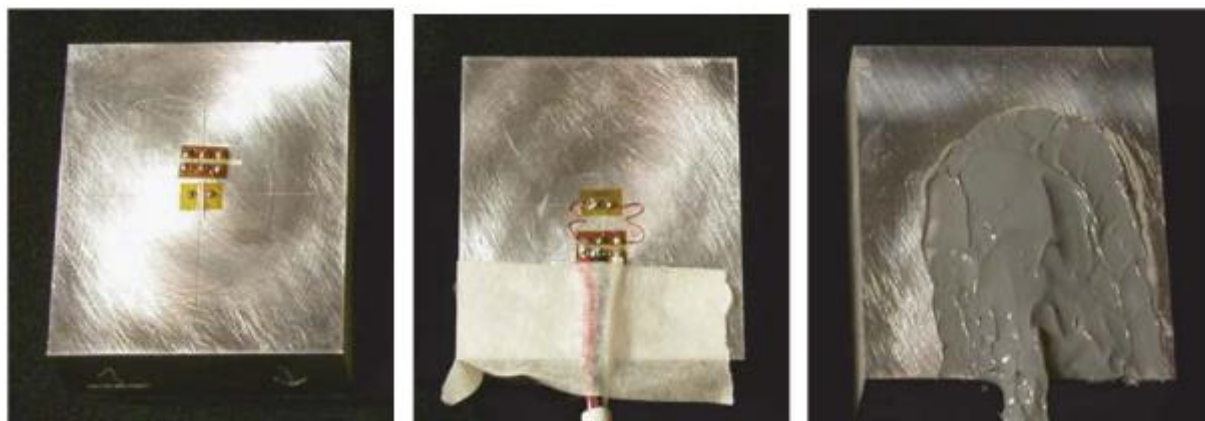
شکل ۲-۲۳: روش Slitting و محل قرارگیری کرنش سنج‌ها

روش Slitting بیشترین کاربرد را برای قطعات منشوری با پروفیل تنش یک جهته دارد به گونه‌ای که پروفیل تنش تنها در یک جهت تغییر می‌کند (در جهتی که شکاف به تدریج بزرگ‌تر می‌شود)

مراحل انجام روش Slitting به شرح زیر می‌باشد

- ۱- آماده‌سازی سطح در محل نصب کرنش سنج‌ها
- ۲- چسباندن کرنش سنج‌های تک جهته در جلو و پشت نمونه و اتصال سیم‌ها
- ۳- ضدآب کردن یا احاطه کردن کرنش سنج‌ها برای اطمینان از عدم آسیب آن‌ها توسط سیال خنک‌کن EDM (در صورت ایجاد شیار توسط تیغه برش و به صورت مکانیکی نیازی به این کار نیست)
- ۴- تنظیم کردن سیم EDM یا تیغه برش در مکان مناسب نسبت به قطعه
- ۵- ایجاد شکاف به صورت تدریجی و تا ۹۰٪ از ضخامت قطعه و ثبت کرنش‌ها در هر گام
- ۶- آنالیز داده‌های خروجی کرنش سنج‌ها و عمق شکاف و محاسبه تنش پسماند

یک نمونه ضد آب کردن کرنش سنج‌ها در شکل زیر نمایش داده شده است. ضد آب کردن معمولاً با استفاده از پوشش 3145RTV انجام می‌پذیرد.



شکل ۲-۲۴: سمت چپ اتصال کرنش سنج، وسط اتصال سیم‌ها و راست ضد آب کردن با پوشش 3145RTV [۱]

مزایای روش Slitting

- عمق اندازه‌گیری تنش پسماند تنها وابسته به ماشین ابزار استفاده شده است و اندازه‌گیری تنش در عمق‌های بالاتر از mm ۱۰۰ نیز امکان پذیر است.
- برای اندازه‌گیری گرادیان تنش بسیار مناسب است.
- قابلیت استفاده برای محدوده وسیعی از مواد شامل مواد فلزی و غیر فلزی را دارد.
- دقت نرمال آن برای آلومینیوم ۱۰ MPa، فولاد ۳۰ MPa و تیتانیوم ۱۵ MPa است.
- با توجه به اینکه قادر به اندازه‌گیری تنش در عمق است، روشی بسیار رقابتی به لحاظ اقتصادی است.

معایب روش Slitting

- یک روش مخرب است
- اندازه‌گیری فقط در آزمایشگاه امکان پذیر است
- قابلیت اندازه‌گیری تنش تنها در یک راستا را دارد.
- در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند سطح نمونه و همچنین در اندازه‌گیری مقادیر بسیار زیاد تنش پسماند خطا وجود دارد.
- امکان استفاده برای قطعات پیچیده وجود ندارد.

۸-۲- روش کانتور

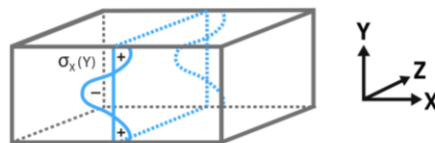
روش کانتور یک روش مخرب اندازه‌گیری تنش پسماند است که بر اساس آزاد شدن کرنش می‌باشد و قادر به اندازه‌گیری تنش در یک جهت در یک صفحه (داخل نمونه) است. این روش برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ معرفی شد [۱۰، ۱۱]. این روش از سه مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول با استفاده از EDM یک صفحه حاوی تنش پسماند از نمونه بریده می‌شود. فرض می‌شود که یک برش کاملاً صاف در قطعه داده شده است. با این برش تنش‌ها در قطعه آزاد شده که سبب ایجاد اعوجاج در صفحه برش خواهند شد. نیرویی که لازم است تا سطح برش را کاملاً صاف کند برابر با تنشی است که با انجام برش آزاد شده است.

مرحله دوم اندازه‌گیری مختصات سطح برش خورده است که ناشی از آزاد شدن تنش، این سطح تغییر شکل داده است. این کار معمولاً با استفاده از CMM انجام می‌پذیرد. این مرحله زمان‌بر ترین بخش این روش است. البته با پیشرفت تکنولوژی لیزر، این مرحله با سادگی و دقت بیشتری انجام می‌گیرد.

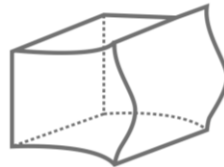
سومین مرحله روش کانتور، آنالیز داده‌ها است. در این مرحله باید داده‌های سه بعدی اعوجاج سطح برش را تبدیل به تنش پسماند در دو بعد کرد که به کمک المان محدود انجام می‌گیرد. داده‌های خامی که از CMM گرفته می‌شود ترکیبی از اعوجاج ایجاد شده ناشی از آزادسازی تنش در سطح برش، زبری ایجاد شده در سطح حین فرایند برش و خطای اندازه‌گیری مختصات سطح برش خورده است. برای این منظور داده‌ها باید قبل از اعمال روی مدل فیلتر و اصلاح شوند. روش‌های مختلفی برای این کار توسعه داده شده است که spline های مسطح کننده یکی از بهترین روش‌ها در این زمینه است. پس از اندازه‌گیری اعوجاج

در هر دو سمت دو قطعه برش خورده (ناشی از برش، نمونه اولیه به دو نمونه تبدیل می‌شود و اعوجاج ایجاد شده روی سطوح بایستی مکمل یکدیگر باشند)، معکوس آن جابجایی متوسط به یک نمونه ساده در نرم‌افزار المان محدود اعمال و شرایط مرزی مناسب جهت جلوگیری از حرکت صلب گونه لحاظ شده و تنش پسماند برای ایجاد این سطح اعوجاج یافته محاسبه می‌شود. به طور خلاصه، روش کانتور یک روش ساده است که به کمک المان محدود، محاسبات تحلیلی را حذف کرده و در نتیجه مهارت لازم برای تبدیل کرنش به تنش را به حداقل مقدار ممکن رسانده است. با اسکن سطح با لیزر این روش بسیار سریع و دقیق شده و می‌تواند تنش پسماند را در یک سطح بزرگ و به صورت دوبعدی نمایان کند.

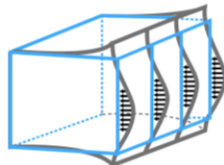
1 ORIGINAL RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION



2 PART CUT IN HALF, STRESS RELIEVED ON FACE OF CUT



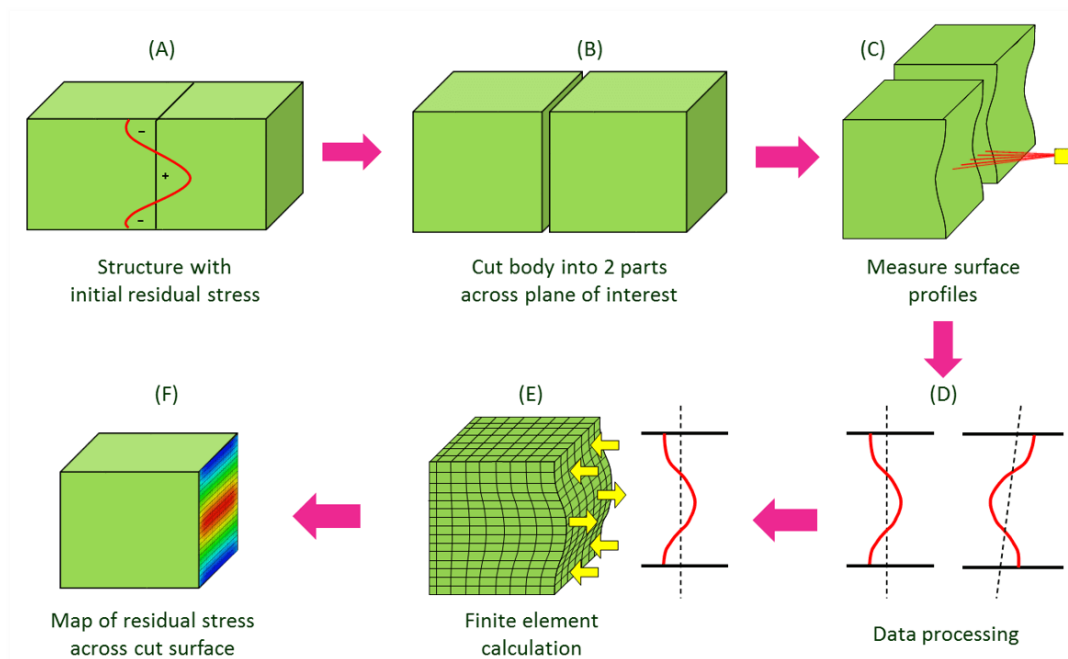
3 CUT SURFACE FORCED BACK TO ORIGINAL STATE



شکل ۲- ۲۵: توصیفی از اصول استفاده شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند در روش کانتور با برش یک سطح [۱۲]

مراحل انجام روش کانتور به شرح زیر است:

- ۱- نمونه را با استفاده از گیره و فیکسچر کاملاً مقید کرده تا کمترین جابجایی در حین برش صورت نپذیرد.
- ۲- استفاده از یک سیم EDM بسیار نازک (ضخامت ۰/۰-۱/۲۵ mm) برای برش نمونه
- ۳- جدا کردن نمونه‌ها از فیکسچر بعد از برش و برای اندازه‌گیری اعوجاج سطح
- ۴- اندازه‌گیری اعوجاج سطوح برش با استفاده از لیزر
- ۵- فیلتر کردن داده‌های اندازه‌گیری شده توسط CMM جهت حذف زبری سطح و نویز دستگاه اندازه‌گیری
- ۶- اعمال معکوس جابجایی به دست آمده به یک مدل ساده در نرم‌افزارهای المان محدود و محاسبه تنش در نرم‌افزار که بیانگر تنش پسماند در نمونه می‌باشد



شکل ۲-۲۶: مراحل انجام روش کانتور [۱۳]

مزایای روش کانتور

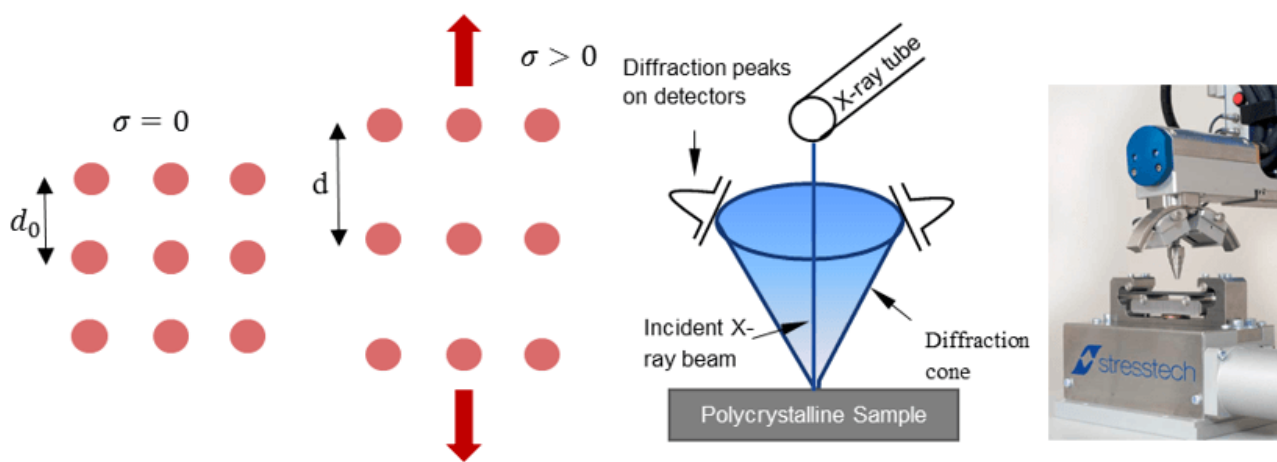
- عمق اندازه‌گیری تنها به‌وسیله سیم برش EDM و محدوده حرکت CMM محدود می‌شود.
- یک میدان تنش دو بعدی کامل از سطح را نتیجه می‌دهد.
- دقت آن با افزایش عمق برش کاهش نمی‌یابد.
- پروسه ساده‌ای دارد و مبتنی بر ابزار استفاده شده و نرم‌افزار المان بوده و کمترین حجم محاسبات را داشته و خطای انسانی در محاسبات نقش بسیار کم‌رنگی دارد.
- دقت نرمال آن برای آلومینیوم ۱۰ MPa و فولاد ۳۰ MPa است [۱].
- نسبت به داده‌های منته‌جه، روش بسیار ارزانی است.
- نسبت به ساختار و ابعاد دانه‌ها حساس نیست.
- این روش هنوز در حال توسعه است.

معایب روش کانتور

- یک روش مخرب است
- اندازه‌گیری فقط در آزمایشگاه امکان پذیر است
- قابلیت اندازه‌گیری تنش در یک صفحه اما در راستای عمود بر سطح را دارد.
- دقت کمی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح دارد
- امکان استفاده برای قطعات پیچیده وجود ندارد.
- به دقت ابزارهای اندازه‌گیری مختصات سطح و همچنین روش‌های فیلتر کردن داده‌ها بسیار وابسته است.

۹-۲- روش پراش اشعه ایکس

روش پراش اشعه ایکس پرکاربردترین روش غیرمخرب برای اندازه‌گیری تنش پسماند و خصوصاً تنش پسماند در سطح است. با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی یا تجهیزات قابل حمل، روش پراش اشعه ایکس قادر به محاسبه تنش پسماند تا عمق $30\mu\text{m}$ و به کمک فاصله بین اتم‌های مواد است. طول موج اشعه ایکس در حدود چند آنگستروم است که در حدود فاصله بین اتمی- بین صفحه‌ای در جامدات پلی کریستالی است. اشعه ایکس پس از برخورد به سطح، در پرتوهای مختلف پراکنده شده و بازتاب می‌یابد. پرتویی که بیشترین شدت را دارد زاویه آن اندازه‌گیری می‌شود و از روی این زاویه فاصله بین صفحه‌ای، d ، صفحات تفرق با استفاده از قانون Bragg به دست می‌آید. در صورت وجود تنش پسماند در جسم، این فاصله تغییر خواهد کرد و تفاوت بین این فاصله با حالت بدون تنش، متناسب با اندازه تنش پسماند است. برای نمونه همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، با وجود تنش کششی، فاصله بین اتم‌ها افزایش می‌یابد. نمونه در دستگاه پراش‌سنج^۳ تحت اشعه ایکس قرار گرفته و توسط آشکارگرها^۴ بازتابش با بالاترین شدت ثبت می‌شود. هم‌اکنون دستگاه‌های پراش اشعه ایکس هم به صورت پرتابل و هم به صورت آزمایشگاهی تولید می‌شوند که یک نمونه از آن‌ها در شکل زیر نمایش داده شده است. در این روش دیگر احتیاجی به کرنش‌سنج نبوده و از فاصله بین دانه‌ها به عنوان کرنش‌سنج‌های داخلی برای محاسبه تنش پسماند بهره برده می‌شود. جهت اندازه‌گیری تنش پسماند با روش X-Ray لازم است که ابعاد دانه‌ها در جسم از $100\mu\text{m}$ بیشتر نباشد، البته برای دستیابی به نتایج بهتر لازم است که ابعاد دانه کمتر از $30\mu\text{m}$ باشد



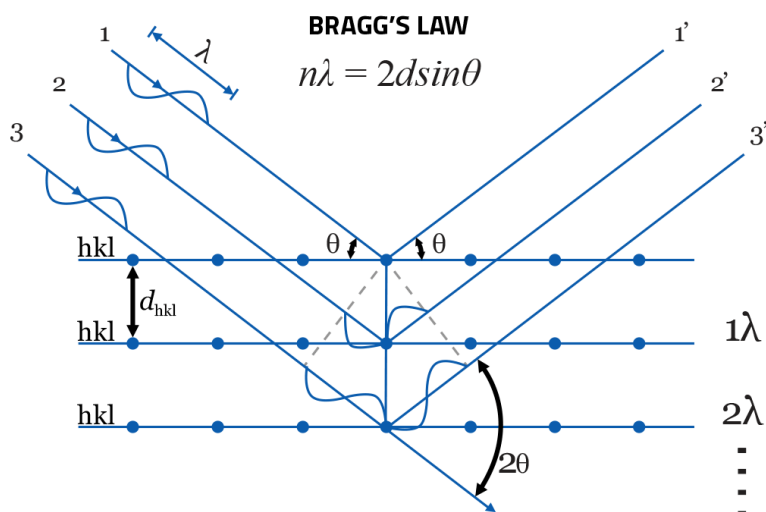
شکل ۲-۲۷: اصول به کار رفته در اندازه‌گیری تنش پسماند یا روش X-Ray [۱۴]

به دلیل عمق نفوذ بسیار کم اشعه ایکس در ماده، عملاً از این روش تنها برای اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح می‌توان استفاده کرد و به همین جهت در این روش فرض می‌شود که شرایط حاکم بر تنش، به صورت تنش صفحه‌ای است. هم‌اکنون با استفاده از تکنیک $\sin^2\psi$ فاصله بین صفحات، d و در نتیجه تنش پسماند قابل محاسبه است. تنش پسماند در دو جهت $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy})$ با استفاده از XRD قابل اندازه‌گیری است و خطای نرمال آن $\pm 20\text{MPa}$ می‌باشد. دقت این روش به آماده‌سازی

³ diffractometer

⁴ detector

سطح و ابعاد و ساختار دانه‌ها در ماده بسیار وابسته می‌باشد. اگرچه این روش برای اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح معمولاً استفاده می‌شود اما می‌توان به کمک روش‌های لایه‌برداری همانند روش EDM، تنش پسماند تا عمق ۱ mm را نیز اندازه‌گیری کرد.



شکل ۲-۲۸: قانون Bragg برای محاسبه فاصله بین اتم‌ها و صفحات [۱۵]

در شکل زیر یک نمونه از اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از دستگاه X-Ray نشان داده شده است. در این شکل پراب میانی اشعه ایکس را به سطح تابانده و نشانگرهای کناری، اشعه بازتابش شده را ثبت می‌کنند.



شکل ۲-۲۹: اندازه‌گیری تنش پسماند در جوش یک لوله با استفاده از X-Ray [۱۴]

مزایای روش پراش اشعه ایکس

- یک روش غیر مخرب است
- قابلیت انجام در آزمایشگاه و یا سایت را دارد
- قابلیت اندازه‌گیری تنش در دو جهت
- دقت بالا در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با مقدار
- قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند قطعات پیچیده
- دقت نرمال آن برای آلومینیوم ۷ MPa، فولاد ۲۰ MPa و تیتانیوم ۱۰ MPa است.
- بسیار سریع و انجام آن نسبتاً ساده بوده و در نتیجه ارزان است.

معایب روش پراش اشعه ایکس

- عمق اندازه‌گیری تنش به صورت استاندارد تنها 10-20 μm است البته با تکنیک‌های لایه برداری می‌توان با این روش تا عمق 1-1.5mm نیز تنش‌های پسماند را محاسبه کرد
- فقط روی مواد پلی کریستالی قابل اعمال است
- دقت آن بسیار وابسته به پرداخت سطح و ابعاد و ساختار دانه‌ها است.
- به دلیل نیاز به یک سطح کاملاً پرداخت شده، آماده‌سازی سطح نسبتاً پیچیده است.

۱۰-۲- پراش سنکرون اشعه ایکس

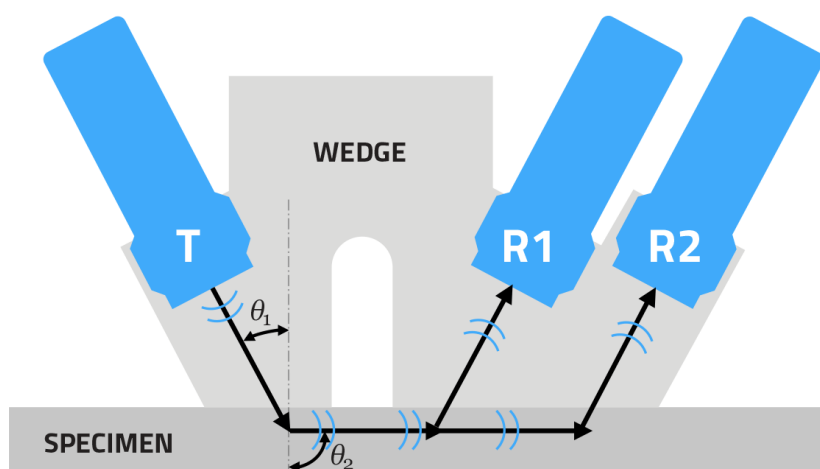
پراش سنکرون^۵ اشعه ایکس، اصولی کاملاً مشابه با پراش اشعه ایکس دارد با این تفاوت که در این روش از اشعه ایکس با انرژی بسیار بالا استفاده می‌شود. در اینجا نیز تغییر فواصل اتمی به سبب وجود تنش پسماند، معیار اندازه‌گیری تنش پسماند است. این روش تنها در آزمایشگاه قابلیت انجام دارد. مراکز محدودی در سراسر جهان تجهیزات مربوط به این روش را در اختیار دارند و عموماً زمان انتظار برای انجام تست، یک الی شش ماه است و هزینه بسیار بالایی نیز دارد. شدت پرتو این روش در حدود یک میلیون بار قوی‌تر از روش پراش اشعه ایکس بوده و به همین جهت قدرت نفوذ بسیار بالاتری نیز دارد. این اشعه می‌تواند تا ۲۰ mm در فولاد و ۱۰۰ mm در آلومینیوم نفوذ کند. دقت این روش $\pm 30\text{MPa}$ در فولاد است. تجهیزات این روش بسیار گران بوده و مراکز انگشت شماری در جهان قادر به تولید این پرتو انرژی پر قدرت هستند. در شکل زیر ساختار یکی از مراکز سنکرون که مقر آن در انگلستان است نمایش داده شده است.

⁵ Synchrotron Diffraction

۲-۱۲- روش آلتراسونیک

روش اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش آلتراسونیک تنها روش قابل حمل و غیر مخربی است که قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق را دارد و قابل اعمال روی بسیاری از مواد است. امواج آلتراسونیک (2 MHz - 10 MHz) معمولاً برای شناسایی عیوب در مواد به کار می‌روند، با این حال می‌توان از آن‌ها برای اندازه‌گیری تنش اعمالی و تنش پسماند نیز استفاده کرد. سرعت امواج آلتراسونیک عبوری از یک ماده با جهت و اندازه تنش موجود تحت تأثیر قرار می‌گیرد (اثر آکستوالاستیک). در نتیجه اندازه و جهت تنش موجود در یک ماده را می‌توان با اندازه‌گیری دقیق در تغییرات زمان حرکت موج آلتراسونیک در نمونه‌های با و بدون تنش پسماند، اندازه‌گیری نمود. برای نمونه تنش ۱ MPa در آلومینیوم معادل با تغییر در زمان حرکت موج آلتراسونیک به میزان 1.7 ns است.

در حال حاضر دو روش برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش آلتراسونیک توسعه داده شده است. یک روش استفاده از امواج آلتراسونیک عرضی است که تنها برای اندازه‌گیری تنش پسماند در داخل ماده کاربرد دارد. با اندازه‌گیری زمان رسیدن موج آلتراسونیک به دو نشانگر مختلف و محاسبه اختلاف زمانی بین آن‌ها، میزان تنش را می‌توان محاسبه نمود. روش دیگر استفاده از امواج سطحی است که به نام امواج Rayleigh نیز شناخته می‌شوند. این امواج تنها در لایه سطح به شرطی که ضخامت آن بسیار بزرگ‌تر از طول موج Rayleigh باشد، گسترش می‌یابند. با اندازه‌گیری تغییرات در سرعت گسترش موج آکوستیک در نمونه، تنش پسماند محاسبه می‌شود. این روش تنها برای اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح کاربرد دارد. لازم به ذکر است که این روش برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با مقدار بالا بسیار مناسب بوده و برعکس برای تنش‌های پسماند با مقدار کم، دقت جواب‌ها کم است.



شکل ۲-۳۲: امواج آلتراسونیک عرضی [۱۷]

مزایای روش آلتراسونیک

- یک روش غیر مخرب است
- قابلیت انجام در آزمایشگاه و یا سایت را دارد
- قابلیت اندازه‌گیری تنش در سه جهت
- دقت بالا در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با مقدار زیاد

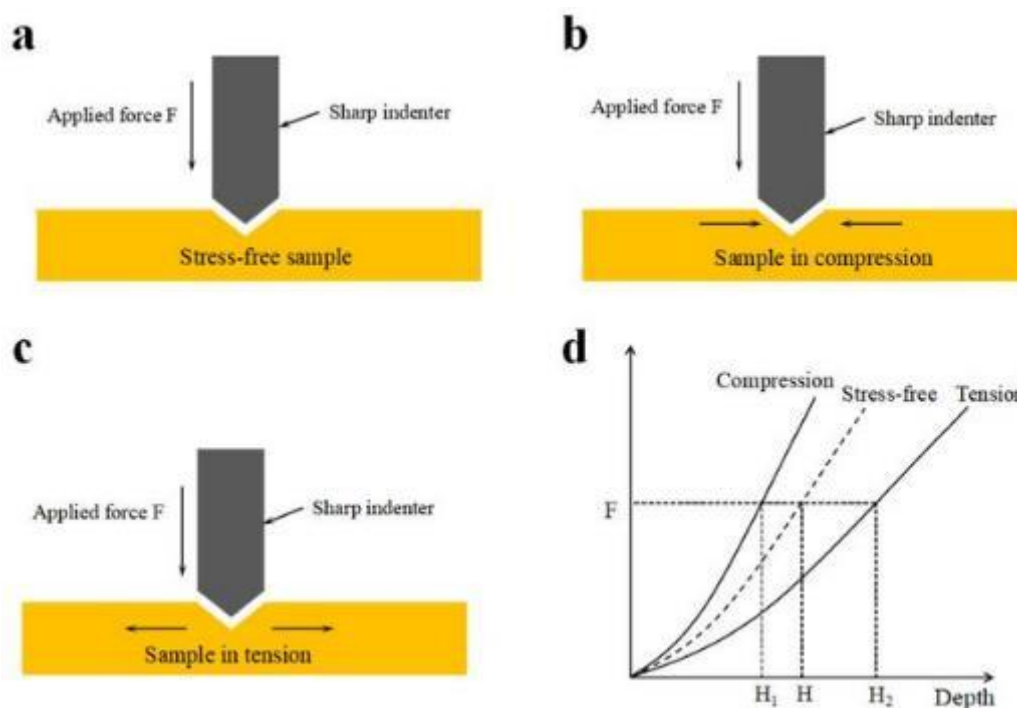
- قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند تا عمق ۱۵۰ mm
- بسیار سریع
- قابلیت استفاده برای بسیاری از مواد

معایب روش آلتراسونیک

- به تغییرات در ریزساختار بسیار حساس است
- قابلیت استفاده برای قطعات پیچیده را ندارد
- نیاز به پرداخت سطح خوب دارد
- یک تنش متوسط در محدوده نسبتاً بزرگی از حجم را نمایش می‌دهد
- نیاز به اندازه‌گیری در یک نمونه بدون تنش دارد.

۲-۱۳- نانوفوذ

هنگام اندازه‌گیری سختی مواد با دستگاه نانوفوذ، وجود تنش پسماند سبب تغییر جزئی در سختی مواد می‌شود. به گونه‌ای که تنش پسماند کششی سبب کاهش سختی و تنش پسماند فشاری سبب افزایش سختی خواهد شد. به عبارتی در نمودار نیرو-عمق، در اثر وجود تنش پسماند کششی نمودار به سمت راست و در اثر تنش پسماند فشاری نمودار به سمت چپ شیفت می‌کند. این تغییرات می‌تواند ابزاری برای اندازه‌گیری تنش پسماند با آزمون نانوفوذ باشند. تلاش‌های بسیاری برای استفاده از این تغییرات جهت محاسبه تنش پسماند در چند سال اخیر صورت پذیرفته است اما به دلیل تأثیر نسبتاً جزئی تنش پسماند در تغییر سختی، دقت محاسبات مناسب نبوده و کمتر از روش‌های دیگر همانند روش سوراخکاری مرکزی است. زمان اندازه‌گیری برای هر نقطه در حدود چند دقیقه بوده و با هر بار می‌توان میانگین تنش در ناحیه‌ای به مساحت یک میلی‌متر مربع را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۲-۳۳: تأثیر تنش پسماند بر منحنی بار-جابجایی آزمون نانوفوذ [۱]

۲-۱۴- فتوالاستیسیته

یکی از روش‌های تحلیل تنش به صورت تجربی روش فتوالاستیک است. در این روش با تاباندن نور به فیلترهای پلاریزه و عبور این نور از نمونه‌هایی با هندسه دلخواه که تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند می‌توان از طریق صفحه آنالایزر، تنش‌ها و کرنش‌های اصلی را مشاهده و محل بیشترین مقادیر تنش که به صورت خطوط رنگی درآمده‌اند را تشخیص داد. نور تابانده شده به فیلترها می‌تواند نور فرابنفش یا مونوکرومیک باشد که در این صورت توزیع تنش به صورت خطوط رنگی و سیاه و سفید قابل مشاهده است.

این روش به مواد شفاف محدود است و معمولاً برای آنالیز تنش مواد شفاف تحت بارگذاری خارجی به کار می‌رود. با این حال می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری تنش پسماند نیز استفاده کرد. یکی از کاربردهای این روش در ساخت لنزهای با کیفیت بسیار بالا است که وجود تنش پسماند در آن‌ها سبب انکسار نور و اختلال در عمل لنز می‌شود. همچنین با پوشش مواد با پلیمرهای فوتوالاستیک، تغییرات در کرنش را می‌توان از طریق بازتابش متفاوت نور، مشاهده کرد.

۲-۱۵- روش مغناطیسی

به سبب حضور تنش پسماند در یک جسم، خواص مغناطیسی آن تغییر می‌کند که با اندازه‌گیری این تغییرات می‌توان تنش پسماند را در یک ماده فرومغناطیس اندازه‌گیری نمود. هم اکنون سه روش برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از مغناطیس وجود دارد که عبارتند از [۱]:

۱- magnetic noise method

۲- magnetic strain method

۳- acoustic emission method magnetic

پرباربردترین روش مغناطیسی برای اندازه‌گیری تنش پسماند، روش Magnetic Barkhausen Noise یا MBN است که در سال ۱۹۱۹ توسط Barkhausen ابداع شد. در این روش تعداد و بزرگی تغییر جهت‌های ناگهانی مغناطیسی که به‌وسیله میدان مغناطیسی مواد فرومغناطیس در فرایند معکوس کردن مغناطیسه مواد ایجاد شده است، اندازه‌گیری می‌شود. به طور خلاصه به این پدیده نویز مغناطیسی می‌گویند. وقتی میدان مغناطیسی موازی با تنش باشد، نویز مغناطیسی با افزایش تنش کششی افزایش و با افزایش تنش فشاری کاهش می‌یابد. بسیاری از مواد مهندسی فرومغناطیس نبوده و نمی‌توان از این روش برای آن‌ها استفاده کرد. اغلب فولادها و برخی از سرامیک‌ها فرومغناطیس هستند و MBN را ایجاد می‌کنند. با این روش تنها می‌توان تنش‌هایی که در محدوده $\pm 300 \text{ MPa}$ و با عمق چند میلی‌متر را اندازه‌گیری کرد. البته اندازه‌گیری در عمق چند میلی‌متر به کمک روش Acoustic Barkhausen Emission امکان‌پذیر شده است. مشکل این روش، حساسیت آن نسبت به پارامترهای دیگری غیر از تنش پسماند است. نویز مغناطیسی به ریزساختار، ابعاد دانه‌ها، عیوب اتمی و تنش پسماند حساس است به همین جهت کالیبراسیون بسیار دقیق با نمونه‌های آیده آل را نیاز دارد. این روش قابلیت اطمینان، دقت و کاربردپذیری نسبتاً محدودی دارد.

۲-۱۶- عملکرد و محدودیت‌های روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند

اکثر روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، تنش را مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌کنند بلکه کرنش یا جابجایی را می‌سنجند و نیاز است تا با محاسبات ریاضی آن‌ها را تبدیل به تنش کرد. به سبب خود تعادل بودن و همچنین فاصله بین محل نصب کرنش‌سنج با محل ایجاد برش در قطعات، نیاز به محاسبات نسبتاً پیچیده برای تبدیل کرنش به تنش است. در جدول زیر برخی از نکات مهم در رابطه با روش‌های مرسوم اندازه‌گیری تنش پسماند آورده شده است. داده‌های این جدول صرفاً برای مقایسه بین روش‌ها است. در رابطه با دقت نوشته شده برای هر روش، حد پایینی برای حالتی است که اندازه‌گیری توسط یک فرد خبره انجام پذیرد و نقاط زیادی مورد بررسی قرار گیرد.

۲-۱۷- استراتژی‌های تعیین روش اندازه‌گیری تنش پسماند

۱- هدف اندازه‌گیری:

اندازه‌گیری برای بررسی احتمال اعوجاج در سازه در اثر وجود و آزاد شدن تنش پسماند است و یا اینکه نگرانی از بابت شکست پیش از موعد وجود دارد؟ تنش پسماند باید در جهات خاص، صفحات خاص و با دقت خاصی اندازه‌گیری شود؟

۲- آسیب نمونه: قابل قبول یا غیر قابل قبول

اگر آسیب بخشی از نمونه و یا کل نمونه امکان‌پذیر است، روش‌های مبتنی بر آسایش تنش معمولاً مناسب‌تر می‌باشند زیرا بسیار ارزاتر و در دسترس‌تر هستند و قابل استفاده برای محدوده وسیعی از مواد می‌باشند. در غیر این صورت روش‌های غیر مخرب باید مورد استفاده قرار گیرند.

۳- هندسه نمونه: هندسه ساده یا پیچیده

برای هندسه‌های ساده می‌توان از تعداد بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری تنش استفاده کرد. از طرفی برخی از روش‌ها تنها برای هندسه‌های ساده قابل اجرا است همانند نمونه تخت. اگر نمونه پیچیده باشد، باید روش‌هایی مانند سوراخکاری و پراش اشعه ایکس استفاده شود.

جدول ۲- ۴: مقایسه عملکرد روش‌های مختلف اندازه‌گیری تنش پسماند [۱]

	Precision	Depth Penetration	Works Best For	Has Limitations With
Splitting	20–50%	Specimen thickness	Routine comparative quality control	Non-uniform and untypical stresses
Sectioning	10–30%	Specimen thickness	Specimens with more regular-shaped geometry	Challenging calculations for multiple sectioning
Stoney	5–20%	Layer thickness	Thin layers on flexible beams	Determining layer thickness accurately
Layer Removal	10–30%	Specimen thickness	Flat plates and cylinders of uniform thickness	Time consuming procedure subject to measurement drift
Hole Drilling (uniform stress)	5–20%	Up to 2 mm typically	Near surface measurements of in-plane uniform stresses	Stresses often are not uniform, max. stress = 70% of yield
Hole Drilling (stress profile)	10–30%	Up to 2 mm typically	Near surface measurements of in-plane stress profiles	Sensitivity to noisy data, max. stress = 70% of yield
Deep Hole	5–15%	Specimen thickness	Large components	Now done only by specialists and compromised by plasticity
Slitting	5–20%	Specimen thickness	1-D perpendicular stress in prismatic shaped specimens	Stresses that are non-uniform across width
Contouring	5–20%	Specimen X-section	2-D perpendicular stress in prismatic shaped specimens	Requires very accurate cutting, not good for near-surface
X-ray Diffraction	~20 MPa	<0.03 mm	Near surface measurements on crystalline materials	Variations in grain structure and surface texture
Synchrotron Diffraction	~50 MPa	>5 mm	Deeper non-destructive measurements than X-ray	Requires synchrotron radiation source and zero stress reference
Neutron Diffraction	~50 MPa	25 mm steel 100 mm Al	Deeper non-destructive meas. than synchrotron	Requires neutron radiation source and zero stress reference
Magnetic BNA	>25 MPa	1 mm	Ferromagnetic materials only	Requires material-specific calibration
Ultrasonic	>25 MPa	1–20 mm	Low-cost comparative measurements	Requires material-specific calibration
Thermoelastic	Qualitative	Varies	Low-cost comparative measurements	Results are not quantitative
Photoelastic	10–30%	Specimen thickness	Full-field measurements in transparent materials	Transparent materials, Results are not quantitative
Indentation	Qualitative	<1 mm	Comparative measurements	Results are not quantitative

۴- ابعاد نمونه: بسیار بزرگ، بسیار کوچک؟

اغلب روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند برای نمونه‌هایی که قابل قرار دادن در داخل دستگاه مورد نظر باشند توسعه داده شده‌اند. همچنین بسیاری از روش‌ها برای یک عمق مشخص توسعه داده شده و قابلیت استفاده برای اعماق کمتر یا بیشتر را ندارند. برای نمونه با سوراخکاری عمیق نمی‌توان تنش پسماند صحیح در اعماق کم را اندازه‌گیری کرد و با روش سوراخکاری

مرکزی نمیتوان تنش پسماند در اعماق بالا را محاسبه نمود. البته برخی از روش‌ها را می‌توان در ابعاد بالاتر یا پایینتر مقیاس کرد تا با ابزارهای اندازه‌گیری بتوان تنشها را در آن‌ها اندازه گرفت.

۵- محیط اندازه‌گیری: آزمایشگاه یا سایت؟

تقریباً همه روشهای اندازه‌گیری برای استفاده در آزمایشگاه توسعه داده شده‌اند. برخی از آن‌ها نیاز به کنترل‌های بسیار دقیقی دارند که فقط در محیط آزمایشگاه امکان پذیر است. برای نمونه می‌توان روش‌های کانتور، پراش اشعه نوترونی و .. را نام برد. اما برخی از روش‌ها برای استفاده در سایت بهینه‌سازی شده‌اند که می‌توان از آن جمله روش‌های سوراخکاری مرکزی، پراش اشعه ایکس، آلتراسونیک و روش مغناطیسی را نام برد که همگی ابزارهای قابل حمل برای اندازه‌گیری تنش پسماند دارند.

۶- در دسترس بودن تجهیزات خاص یا نیاز به تجربه در اندازه‌گیری تنش

استفاده از روشی که همه ابهامات در اندازه‌گیری آن برطرف شده است، قطعاً اطمینان خاطر بالاتری دارد. برای نمونه می‌توان روش سوراخکاری مرکزی را نام برد که به دلیل سابقه و گستردگی زیاد استفاده از آن، دغدغه علمی برای استفاده از آن وجود ندارد. از طرفی برای برخی از روش‌ها نیاز به تجربه بسیار زیادی برای استفاده از آن‌ها وجود دارد و در غیر این صورت احتمال خطای اندازه‌گیری بالا خواهد بود.

۷- نوع تنش پسماند: یکنواخت، با گرادیان زیاد، سطحی و یا داخلی

استفاده از برخی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند مستلزم یکنواخت بودن تنش در یک فاصله مشخص است. برای نمونه روش‌های لایه برداری و Slitting را می‌توان نام برد. این در حالی است که روش‌های دیگر این قید را ندارند که روش‌های XRD و سوراخکاری از آن جمله هستند. برخی از روش‌ها مانند XRD تنها برای اندازه‌گیری تنش در سطح مناسب هستند در حالیکه روش‌هایی مانند روش کانتور یا Slitting تنها برای اندازه‌گیری تنش در عمق قابل استفاده می‌باشند.

۸- جنس نمونه: فلزی، کریستالی، آمورف، تنش تسلیم بالا یا پایین

روش‌های مبتنی بر آزادسازی تنش قابل استفاده برای اکثر مواد هستند هر چند که برای مواد با تنش تسلیم بسیار بالا یا بسیار پایین چالش‌های زیادی برای ایجاد برش بدون ایجاد تنش پسماند وجود دارد. در روش‌های مبتنی بر پراش، تنها مواد کریستالی قابلیت استفاده دارند و برای روش مغناطیسی تنها مواد فرومغناطیس.

۹- دقت و محدوده اندازه‌گیری: مقدار دقیق یا یک اندازه‌گیری تقریبی

برخی از روش‌ها تنها یک دید کلی از تنش پسماند را نتیجه می‌دهند و نسبتاً سریع نیز هستند مانند روش tube splitting. برخی از روش‌ها مانند آلتراسونیک یا مغناطیسی نیاز به کالیبره شدن برای ماده مورد نظر را دارند. برخی از روش‌ها در یک محدوده وسیع تنش پسماند را اندازه‌گیری می‌کنند مانند روش کانتور اما روش‌هایی مانند سوراخکاری یا نانوفوذ تنها در یک منطقه بسیار محدود تنش‌ها را محاسبه می‌کنند.

۱۰- هزینه و مدت زمان انجام پروسه: ارزش و تعداد نمونه‌ها

روشهای پرهزینه ای مانند پراش اشعه نوترونی تنها زمانی قابل استفاده هستند که تعداد کمی نمونه مورد اندازه گیری قرار گیرد. از طرفی دیگر روشهای دیگری مانند آلتراسونیک، مغناطیس و حتی XRD بسیار ارزانتر بوده و برای تعداد زیاد نمونه ها استفاده می شود.

جدول ۲- ۵: مشخصه های روش های اندازه گیری تنش پسماند. X محدودی و XX همیشه وجود دارد [۱]

	Low Damage	Field Use	General Geometry	General Material	Quick, Low Cost	Quantitative	Stress Profile	Near Surface	Deep Interior
Splitting		XX		XX	XX				
Stoney	X			XX	XX	X		XX	
Sectioning			X	XX		X	XX	X	XX
Layer Removal			X	XX		XX	XX	X	XX
Hole Drilling	X	XX	XX	XX	X	XX	X	XX	
Deep Hole	X		XX	XX		XX	XX		XX
Slitting			XX	XX		XX		XX	XX
Contouring			XX	XX		XX		X	XX
X-ray Diffraction	XX	XX	XX	X	X	XX	XX	XX	
Synchrotron Diffraction	XX		XX	X		X	X		XX
Neutron Diffraction	XX		XX	X		X	X		XX
Magnetic BNA	XX	XX	XX		XX	X	XX	XX	
Ultrasonic	XX	XX	XX	XX	XX	X	XX	XX	
Thermoclastic	XX	X	X	X	X		X	X	
Photoelastic	XX	X	X		X		X		X
Indentation	X	XX	X	XX	XX		X	XX	

۳- فصل سوم: روش‌های ایجاد تنش پسماند فشاری

۱-۳- مقدمه

یکی از مباحث بسیار مهم در تنش‌های پسماند، روش‌های مختلف اعمال تنش پسماند فشاری جهت افزایش عمر قطعات و سازه‌ها است. به بیانی دیگر برخلاف تنش‌های پسماندی که در حین ساخت ایجاد می‌شوند و سبب کاهش عمر قطعه می‌شوند در اینجا برای افزایش عمر یک قطعه، تنش پسماند فشاری به سازه اعمال می‌گردد. برای این منظور چندین دهه است که روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند و در دو دهه اخیر نیز شاهد ابداع روش‌های نوین در این زمینه هستیم.

۲-۳- روش ساچمه‌زنی

به طور کلی برای ایجاد تنش‌های پسماند فشاری از روش‌های مختلف مکانیکی و ترموشیمیایی می‌توان استفاده کرد. ساچمه‌زنی و نورد موضعی سطح از جمله روش‌های مکانیکی قابل استفاده برای ایجاد تنش‌های پسماند می‌باشند. درحالی‌که از انواع عملیات حرارتی مانند نیتروژن‌دهی سطحی و ... می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از روش‌های ترموشیمیایی یاد کرد.

ساچمه‌زنی در واقع نوعی فرآیند کار سرد است که در آن برخورد مواد مختلف همچون فلزات آهنی (چدن و فولاد)، سرامیک یا شیشه توسط ذره‌های ریز کروی به سطح فلزات، موجب ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعه می‌گردد. کار سرد ناشی از ساچمه‌زنی باعث اعمال تنش به سطح نمونه‌ها شده و سطح با دریافت این تنش دچار کارسختی شده و تنش پسماند فشاری در آن ذخیره می‌شود. این فرآیند برای مدت‌ها به عنوان یکی از بهترین فرآیندهای ایجاد تنش‌های پسماند فشاری شناخته می‌شده است عموماً ساچمه زنی به منظور بالا بردن برخی خواص مکانیکی همچون افزایش عمر خستگی و مقاومت در برابر ضربه و خوردگی تنشی بر روی قطعه‌های مختلف انجام می‌گیرد. نتایج تحقیقات نشان دهنده این است که تنش پسماند فشاری در قطعاتی که تحت تأثیر تنش‌های کششی متناوب قرار دارند، باعث افزایش فوق‌العاده عمر خستگی آن‌ها می‌شود. بهبود در رفتار خستگی قطعه‌ها بعد از انجام ساچمه زنی ناشی از دو عامل اصلی است: ۱) تغییر شکل پلاستیک و کار سختی لایه‌های سطحی در اثر پذیری از انرژی جنبشی جریان ساچمه‌ها که باعث بالا رفتن تنش تسلیم می‌شود و ۲) ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه‌های سطحی که در اثر ساچمه زنی حاصل می‌گردد.

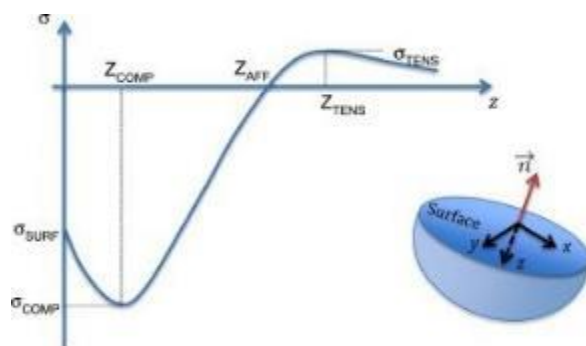


شکل ۳-۱: ساچمه‌زنی پره‌های توربین

تحقیقات مختلفی در مورد اثرهای ساچمه زنی بر روی رفتار خستگی و رشد ترک خستگی انجام شده است. به طور کلی می‌توان اظهار داشت که نسبت زمان ایجاد ترک به زمان انتشار ترک‌های خستگی در نمونه‌های ساچمه زنی شده نسبت به نمونه‌های ساده بیشتر است. ساچمه زنی به‌طور موثر بر روی رشد ترک در محدوده ترک‌های کوتاه تأثیر می‌گذارد زیرا رشد ترک در این منطقه شدیداً به ویژگی‌های ریزساختاری وابسته است. نرخ رشد ترک‌های کوتاه در نمونه‌های ساچمه زنی شده بسیار کمتر است زیرا علاوه بر اثر تنش پسماند اولیه مقاومت در مقابل تغییر شکل پلاستیک نوک ترک به دلیل کار سختی بسیار بالا است.

هرچه شدت ساچمه‌زنی افزایش یابد، تأثیر بیشتری در رفتار خستگی مشاهده می‌شود. ساچمه زنی زمان ایجاد ترک و عمر کلی خستگی را افزایش می‌دهد. اندازه‌گیری تنش‌های پسماند و توزیع آن‌ها در عمق قطعه از اهمیت خاصی برخوردار است. به دلیل اینکه کیفیت و میزان تأثیر ساچمه زنی به عوامل بسیاری از قبیل نوع و اندازه ساچمه‌ها، شدت ساچمه زنی، پوشش سطح و خواص ماده بستگی دارد. بنابراین اثر پارامترهای فرآیند ساچمه زنی بر اندازه و توزیع تنش‌های پسماند و همچنین تعیین شرایط لازم جهت حصول توزیع بهینه تنش‌ها بسیار قابل توجه است.

هنگام برخورد ساچمه‌ها با انرژی جنبشی بالا به سطح مورد نظر، محل برخورد ساچمه در سطح فلز وارد ناحیه پلاستیک می‌شود در حالی که لایه‌های زیرین این قسمت از سطح هنوز در حالت الاستیک قرار دارند. با بلند شدن ساچمه از سطح و برگشت الاستیک لایه‌های زیر سطح در محل برخورد ساچمه، سطح تحت تنش فشاری ناشی از این برگشت قرار می‌گیرد. در اغلب فرآیندهای شکست زمانبر، عامل اصلی شکست، تنش‌های کششی میباشند. این تنش‌ها می‌توانند ناشی از اعمال بار خارجی و یا تنش‌های باقیمانده در اثر فرآیند ساخت (مانند جوشکاری و سنگ زنی و ...) باشند. عموماً تنش کششی تمایل دارد تا ذره‌های تشکیل دهنده قطعه را از هم دور کند و در نتیجه می‌تواند باعث ایجاد ترک شود. اما تنش فشاری باعث فشردن شدن مرز دانه‌های سطحی شده و شروع ترک را به مدت قابل ملاحظه‌ای به تأخیر می‌اندازد. از طرف دیگر از آنجایی که رشد ترک در ناحیه تحت فشار بسیار آهسته‌تر است هرچه عمق سطح فشرده شده بیشتر باشد میزان مقاومت به ترک نیز بیشتر خواهد بود. از آنجائیکه همیشه باید بین نیروها و تنش‌های موجود در یک قطعه تعادل وجود داشته باشد تا آن قطعه پایدار بماند، در قطعه‌های ساچمه زنی شده تنش‌های پسماند فشاری به صورتی توزیع می‌گردند که مقدار جبری تنش‌های پسماند تولید شده در تمام مقطع قطعه صفر گردد به این معنی که بین تنش‌های پسماند تولید شده در راستای مقطع قطعه تعادل برقرار می‌شود. بنابراین از زیر سطح، جایی که مقدار تنش پسماند فشاری بیشینه است این تنش به تدریج تغییر علامت داده تا اینکه مقدار کل تنش پسماند موجود در سطح قطعه به صفر برسد.



شکل ۳-۲: دیاگرام عمومی تنش پسماند در عمق در اثر ساچمه زنی

از عوامل موثر بر بهبود خواص مکانیکی قطعه حاصله توسط ساچمه زنی می‌توان به مقدار سرعت، اندازه، وزن و زاویه برخورد ساچمه‌ها به سطح قطعه کار نام برد. با تغییر هر یک از این موارد، خواص مکانیکی به دست آمده از قطعه کار متغیر خواهد بود. نحوه شکل‌دهی نیز بدین صورت است که ساچمه‌ها با اندازه و سرعت مشخصی توسط نازل به سطح قطعه کار پرتاب شده (که ممکن است سرعت ساچمه‌ها گاهی تا 220 m/s نیز برسد) و تحت اثر این سرعت و زاویه به سطح قطعه کار برخورد می‌کنند. این برخورد، باعث ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه سطحی قطعه کار می‌شود. با برخورد هزاران ساچمه به سطح قطعه کار، به تدریج تمام لایه سطحی قطعه کار تحت تنش فشاری ایجاد شده ناشی از برخورد ساچمه‌ها قرار می‌گیرد.

البته نمی‌توان عمل ساچمه زنی را به طور کامل و 100% روی تمام سطح یک قطعه انجام داد و همیشه مقدار ناچیزی از سطح قطعه در عمل ساچمه‌زنی نمی‌شود. این مقدار بنابر دقت مورد نیاز، شکل هندسی قطعه کار و امکانات در دسترس قابل کاهش است. عموماً با تکمیل حدود 98% از ساچمه‌زنی سطح قطعه کار، می‌توان گفت که ساچمه‌زنی کامل انجام گرفته و خواص مکانیکی قطعه بهبود یافته است. با این عمل در واقع کار سختی صورت گرفته است.

ساچمه زنی مدرن از دهه ۱۹۳۰ گسترش یافته است. در سال ۱۹۴۵ جان آلمن روش اندازه‌گیری شدت ساچمه زنی را ثبت تجاری نمود. بسیاری از متخصصین آقای آلمن را پدر ساچمه زنی مدرن می‌دانند. او از یک تسمه فلزی، که امروزه تسمه آلمن (شکل ۳-۳) نامیده می‌شود، و یک سیستم اندازه‌گیری قوسی با نام امروزی گیج آلمن (شکل ۳-۴) برای اندازه‌گیری شدت برخورد ساچمه به قطعه بهره گرفت. تسمه آلمن بر روی یک بلوک تخت با ۴ پیچ محکم می‌شود. زمانیکه تسمه تحت فرایند ساچمه‌زنی قرار می‌گیرد، تنش فشاری بر روی سطح ساچمه ایجاد می‌شود. پس از برداشتن تسمه از روی بلوک، به دلیل عدم تحمل تنش اعمالی توسط این تسمه نازک، قوس بر می‌دارد. این قوس با گیج آلمن اندازه‌گیری می‌شود.

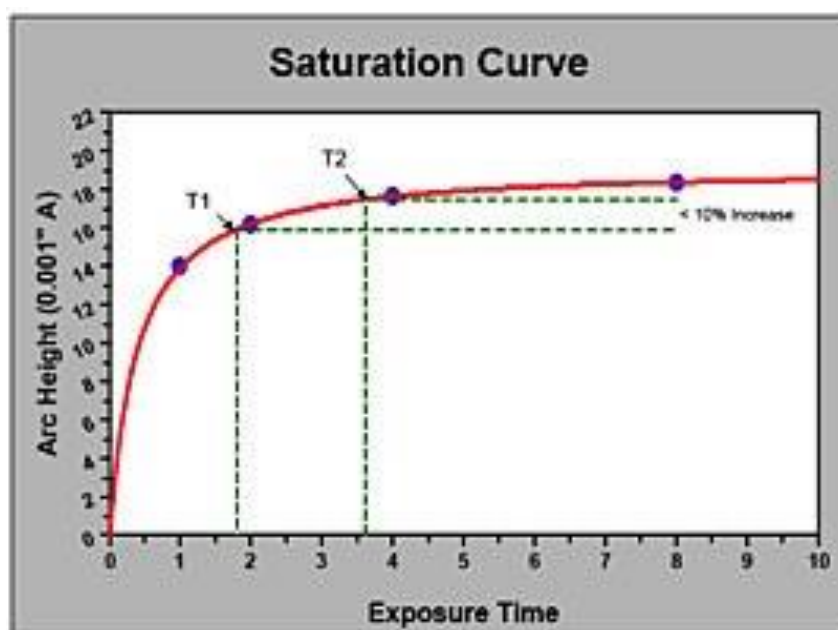


شکل ۳-۳: تسمه آلمن



شکل ۳-۴: گیج آلن

ارتفاع این قوس‌ها بر حسب زمان قرار گرفتن در معرض ساچمه‌ها را بر روی نموداری رسم می‌کنند. نمودار کامل این تست با قرار گرفتن تسمه آلن در معرض جریانی از ساچمه‌ها در زمان‌های مختلف ترسیم می‌گردد (شکل ۳-۵). از روی نمودار می‌توان شدت جریان ساچمه را با ارزیابی اولین نقطه (یا اولین شدت) بر روی بهترین خط مماس بر نمودار در نقطه دو برابر شدن زمان بدست آورد که نشان‌دهنده افزایش ده درصدی در ارتفاع قوس می‌باشد. این تست به تولیدکنندگان در سطح جهان کمک می‌کند تا بتوانند یک فرایند ساچمه‌زنی مشخص را تکرار نمایند.

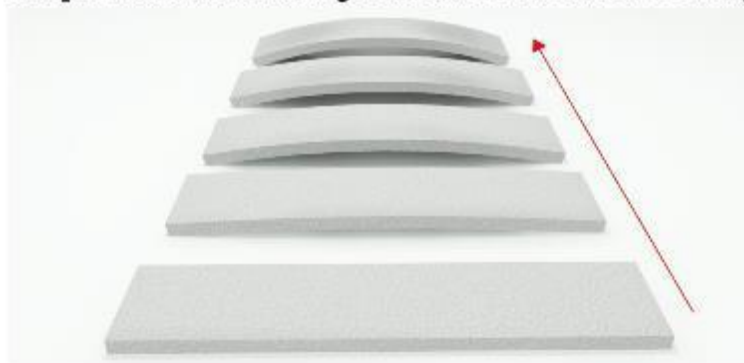


شکل ۳-۵: رابطه میان ارتفاع قوس‌ها و زمان ساچمه‌زنی.

شدت ساچمه‌زنی یک پارامتر اساسی در کنترل پروسه ساچمه‌زنی است. شدت ساچمه‌زنی با نوار و گیج آلن اندازه‌گیری می‌شود. شدت جریان ساچمه‌های پرتاب شده توسط میزان تغییر شکل یا خمش نوار آلن مشخص می‌شود. اندازه ساچمه،

سختی ساچمه، چگالی ساچمه و سرعت ساچمه شدت ساچمه‌زنی را افزایش می‌دهد. سختی بالاتر ساچمه‌ها سبب افزایش مقدار تنش پسماند فشاری می‌شود. در شکل زیر تأثیر شدت ساچمه‌زنی بر تغییر شکل نوار آل‌من نمایش داده شده است.

Strips with Increasing Amounts of Shot Peening



شکل ۳-۶: تأثیر شدت ساچمه زنی بر تغییر شکل نوار آل‌من

هم اکنون شاخه های مختلفی از روش ساچمه زنی گسترش یافته است که در ادامه برخی از آنها ذکر شده است:

- Air Shot Peening
- Cavitation Peening or Water Jet Peening
- Centrifugal Wheel Shot Peening
- Hammer Peening
- Laser Ablation Peening
- Peen Marking
- Powder Impact Plating (PIP)
- Rotary Flap Peening
- Shot Peen Forming
- Ultrasonic Needle Peening (UNP) or Ultrasonic Impact Treatment (UIT)
- Ultrasonic Shot Peening
- Water or Wet Shot Peening

جدول ۳-۱: تأثیر عملیات ساچمه زنی بر افزایش عمر خستگی قطعات مختلف [۲]

Type of part	Type of stress	Increase in the fatigue life (%)
Spindles	Reverse bending	400–1900
Shafts	Torsional	700
Gear box	Fatigue life tests in service	80
Crankshafts	Fatigue life tests in service	3000, but highly variable
Aircraft coupling rods	Tensile compression	105
Driving rods	Tensile compression	45
Cam springs	Dynamic stress	100–340
Helical springs	Fatigue life in service	3500
Torque rods	Dynamic stress	140–600
Universal joint shaft	Reverse bending	350
Gear wheel	Fatigue life tests	130
Tank chain	Fatigue life tests	1100
Weld	Fatigue life tests	200
Valve	Fatigue life tests	700
Rocker arm	Fatigue life tests	320

۳-۳- لیزر پینینگ

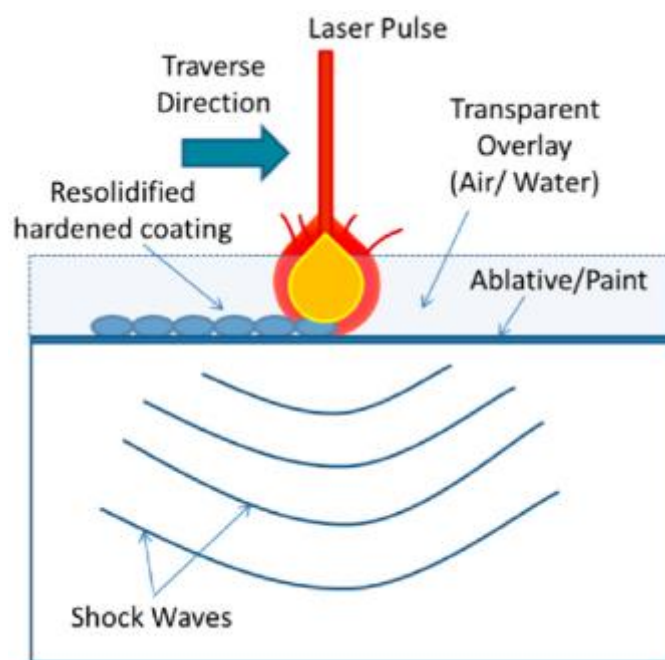
عملیات ساچمه‌زنی محدودیت‌هایی دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از:

- (۱) در تعیین تنش‌های پسماند تولید شده فرآیند ساچمه‌زنی تا حدودی کیفی بوده و به نوار و گیج آلن جهت تعیین شدت ساچمه‌زنی وابسته است و همچنین تضمینی نیست که شدت ساچمه‌زنی در سراسر اجزای قطعه یکنواخت باشد.
- (۲) عمق تنش‌های پسماند فشاری محدود است و معمولاً از ۰٫۲۵ mm در فلزات نرم مانند آلیاژهای آلومینیم بیشتر نیست و در فلزات سخت‌تر کمتر است.
- (۳) عملیات ساچمه‌زنی، زبری سطح را نتیجه می‌دهد (بویژه در فلزات نرمی مانند آلومینیم) این زبری لازم است که در فرآیندهایی که با سایش همراه است برطرف شود.

فرآیند جدیدی بنام فرآیند شوک لیزر یا لیزر پینینگ می‌تواند تنش‌های پسماند قابل تکرار و با عمق بیشتری در سطح فلزات ایجاد کند. این کار به وسیله توان بالای پالس لیزر انجام می‌شود. توانایی باریکه پالس لیزر در تولید امواج شوک برای اولین بار نزدیک به سال ۱۹۶۰ کشف گردید. مطالعات بعدی شرایط را برای افزایش دامنه امواج تنش فراهم کرد و امکان تغییر شکل پلاستیک در سطح هدف فلز را ایجاد کرد. لیزر پینینگ برای اولین بار در آزمایشگاه Battelle در سال ۱۹۶۵ انجام شد اما به علت قابلیت اطمینان کم، نیاز به سرعت بازخورد بالا و توان بالای لیزر تجاری نشد. پس از آن هیچگونه اطلاع رسانی علمی درباره لیزر پینینگ نبود تا اولین کاربرد تجاری لیزر پینینگ در سال ۱۹۹۷ در مورد بهبود آسیب ماده خارجی، روی لبه جلو تیغه پروانه برای توربو موتور یک هواپیمای نظامی مطرح شد.

توانایی‌های لیزر پینینگ در چند سال گذشته رشد فوق العاده‌ای کرده است. لیزر پینینگ می‌تواند عمقی حدود یک میلی‌متر و لایه تنش‌های پسماند فشاری در آلیاژ آلومینیم تجاری ایجاد کند که به طور مهمی خستگی را بهبود می‌دهد به علاوه لیزر پینینگ نشان می‌دهد که به طور مهمی در سختی سطح و بهبود خواص مکانیکی برخی از قطعات فلزی تجاری در دسترس موثر است مانند: فولاد کربن‌دار، فولادهای زنگ‌نزن و چدن‌ها، آلیاژهای آلومینیم و تیتانیوم و سوپر آلیاژهای نیکل. با این حال انجام این عملیات نیاز به بررسی و تحقیق بیشتری دارد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که لیزر پینینگ به طور قابل قبولی در بهبود رشد ترک موثر است زیرا ترک‌هایی که به ناحیه لیزر پینینگ شده رسیده بودند در این ناحیه متوقف شدند.

این فرایند می‌تواند با استفاده از یک لیزر پالسی با انرژی پالس نسبتاً بالا و عرض پالس بسیار کوتاه در قطعات ایجاد تنش پسماند کند. شماتیک فرایند در شکل زیر نشان داده شده است. در این فرایند سطح قطعات با استفاده از یک لایه بسیار نازک ماده جاذب پرتو لیزر با ضخامت در حدود ۱۰۰ میکرون مانده رنگ سیاه تجاری (رنگ پلیمری) یا فویل آلومینیومی بسیار نازک پوشانده شده و سپس یک لایه شفاف به نام لایه محدودکننده مانند آب، شیشه یا کوارتز با ضخامت یک تا دو میلی‌متر روی آن قرار داده می‌شود. با تابش یک پالس لیزر با عرض پالس بسیار کوتاه، اغلب در حدود ۵ تا ۱۰۰ نانوثانیه با چگالی توان بالا در حد چندین گیگاوات بر سانتیمتر مربع بر روی قطعه، انرژی لیزر توسط ماده جاذب، دریافت شده و این ماده تبخیر و سپس به فاز پلازما تبدیل می‌شود. پلازما ایجاد شده، در بین سطح ماده کار و لایه شفاف محدود شده و فشار آن در حدود ۱۰۰ برابر بیشتر شده و تا چندین گیگاپاسکال افزایش پیدا می‌کند و در نهایت باعث انتشار یک موج ضربه شدید در قطعه شود.



شکل ۳-۷: شماتیک فرایند LSP

چنانچه فشار این پلاسما از حد تسلیم ضربه‌ای ماده کار (Hugoniot Elastic Limit به اختصار HEL) بیشتر شود، فلز ماده کار به تسلیم رسیده و دچار تغییر شکل پلاستیک شده و در سطح کار تنش پسماند فشاری با عمق حدود یک میلی‌متر (بسته به میزان انرژی پالس لیزر و عرض پالس آن) ایجاد می‌شود. با تکرار پالس‌های مکرر لیزر با همپوشانی مناسب و پوشش دادن سطح و یا ناحیه مورد نیاز، تنش پسماند در کل سطح مورد نظر ایجاد می‌شود [۱۸].

نکته حائز اهمیت در این فرایند این است که به دلیل اینکه عرض پالس بسیار کوتاه و در حد چندین نانوثانیه است و نیز چون یک لایه محافظ (لایه جاذب لیزر) روی سطح کار قرار گرفته است، لیزر اثر حرارتی قابل ملاحظه‌ای بر روی سطح کار نداشته و تقریباً همه اثرات فرایند روی قطعه کار کاملاً مکانیکی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین می‌توان از اثرات حرارتی لیزر تا حد زیادی چشم پوشی کرد.

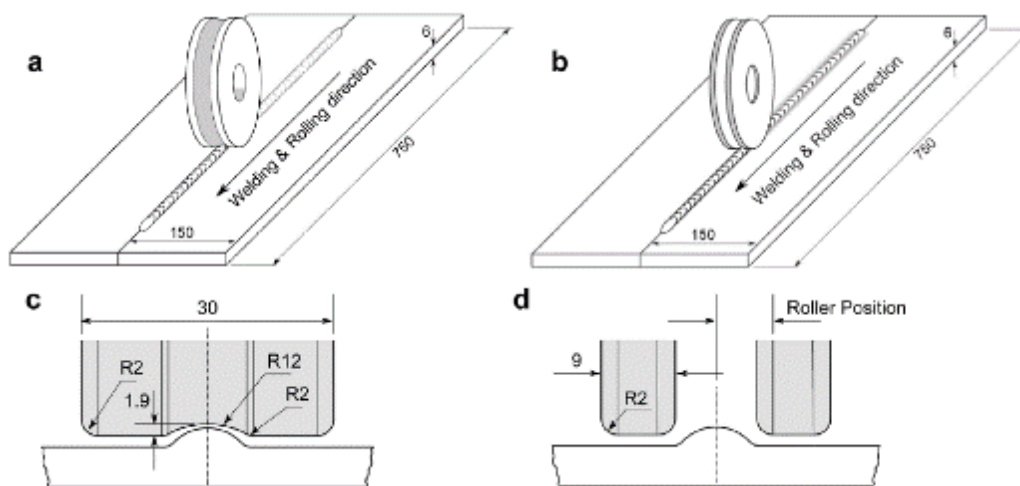
از جمله اثرات جانبی فرایند علاوه بر ایجاد تنش پسماند فشاری، ریز دانه شدن سطح قطعات و کارسختی به دلیل انجام کار پلاستیکی سرد روی سطح آن‌ها است [۱۹، ۲۰]. فرایند LSP کاربردهای بسیاری دارد که مهمترین آن افزایش عمر خستگی قطعات فلزی است. دیگر کاربردهای این فرایند عبارتند از بهبود خواص مکانیکی، سختی، مقاومت به سایش [۲۱] و مقاومت به خوردگی تنشی [۲۲]. از جمله مهمترین کاربردهای این فرایند در صنایع هوا و فضا برای بهبود عمر خستگی قطعات موتورهای توربینی به ویژه پره توربین موتورهای جت و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر تخریب ناشی از اشیا پرنده (FOD^۶) می‌باشد. این فرایند از لحاظ کاربردی، مشابه با ساچمه‌زنی است با این تفاوت که عمق تنش پسماند ایجاد شده در این روش بسیار بیشتر و در حدود چهار برابر عمق تنش پسماند ایجاد شده در روش ساچمه زنی است و از یکنواختی بیشتری برخوردار است و با وجود

^۶ Flying Object Damage

داشتن این مزایا، تخریب زیادی در کیفیت سطح قطعات ایجاد نمی‌کند و می‌تواند به صورت محلی برای ایجاد تنش پسماند فشاری فقط در یک نقطه دلخواه استفاده شود.

۳-۴- غلتک کاری

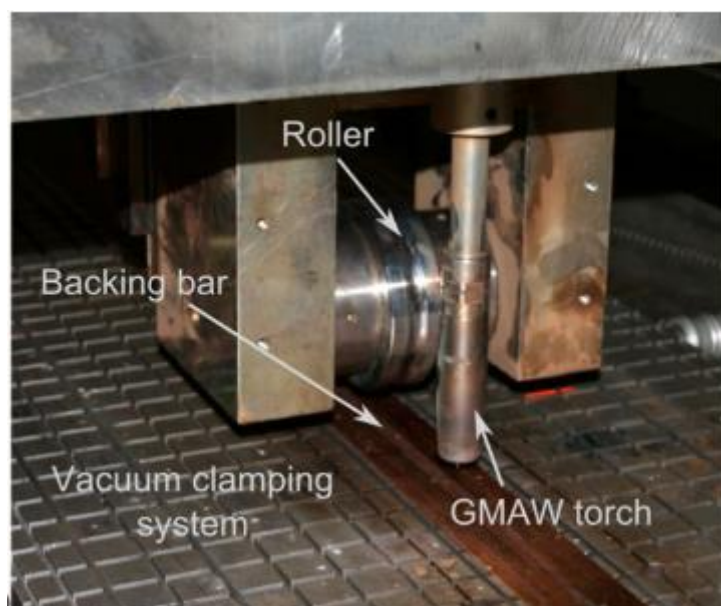
یکی از روش‌های قدیمی و مرسوم برای ایجاد تنش پسماند فشاری روش غلتک کاری سطح است. این روش خصوصاً برای جوش‌ها کاربرد زیادی دارد. با استفاده از این روش، نیروی فشاری بسیار زیادی به سطح وارد می‌شود که سبب ایجاد تنش فشاری بالاتر از حد تسلیم ماده شده و پس از باربرداری، در سطح ماده شاهد تنش پسماند فشاری هستیم. این روش محدودیت‌های زیادی برای قطعات با ضخامت کم دارد زیرا در این قطعات امکان تغییر شکل دائمی بسیار زیاد است. کاربرد اصلی این روش برای قطعاتی است که عملکرد آن وابسته به شکل هندسی آن‌ها نبوده و در صورت ایجاد تغییر شکل دائمی، خللی در کارایی آن‌ها ایجاد نشود. از طرفی دیگر این روش تقریباً محدود به سطوح مسطح بوده و اعمال آن به سطوح غیر مسطح کاری بسیار پیچیده است. برای نمونه در شکل زیر دو روش غلتک کاری سطح جوش آورده شده است. در (a) گرده جوش و در (b) لبه‌های جوش در دو طرف غلتک کاری می‌شوند.



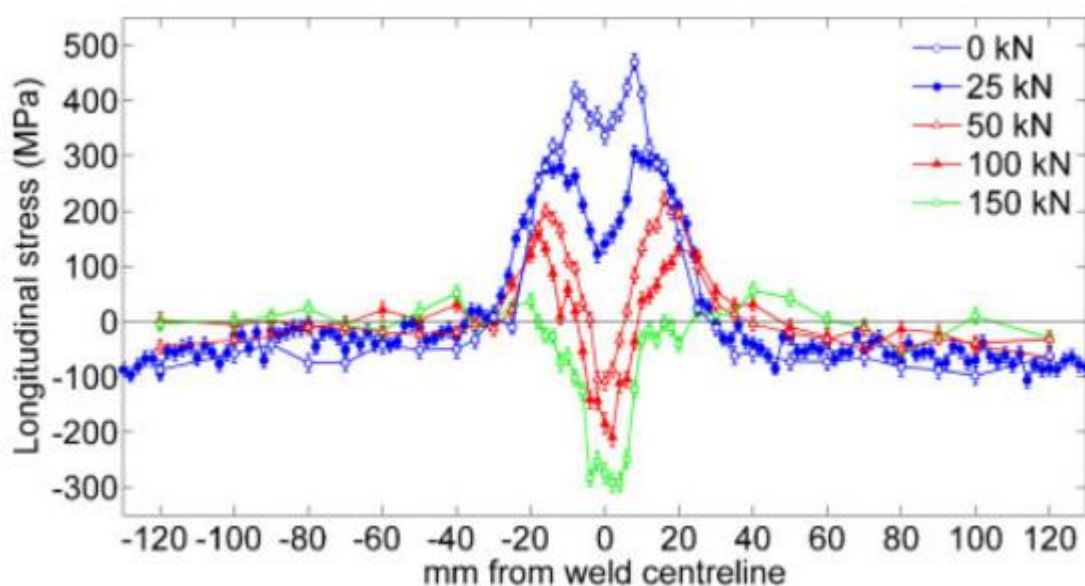
شکل ۳-۸: دو روش مرسوم غلتک کاری سطح جوش [۲۳]

در تحقیق انجام گرفته توسط Cozzolino و همکارانشان [۲۳] مشخص گردید که ضریب اصطکاک تأثیر بسیار زیادی بر تنش‌های پسماند بعد از فرآیند غلتک کاری دارد. هر دو روش سبب ایجاد تنش پسماند فشاری در جوش می‌شوند اما هنگامی که لبه‌های خط جوش غلتک کاری می‌شود فاصله غلتک از لبه، تأثیر بسیار زیادی در مقادیر تنش پسماند دارد و بهترین عملکرد برای حالتی است که غلتک مماس بر خط جوش باشد.

در کار تجربی که در سال ۲۰۱۲ توسط Coules و همکارانش [۲۴] انجام گرفت دو حالت غلتک کاری پس از جوشکاری و غلتک کاری در حین جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳-۹، طریقه غلتک کاری در حین جوشکاری نمایش داده شده است. با انجام آزمایشات مشخص گردید که غلتک کاری حین جوشکاری هیچ تأثیری بر تنش‌های پسماند جوش ندارد که دلیل آن عدم سرد شدن ماده و در نتیجه ایجاد نشدن تنش پسماند کششی در آن است. در شکل ۳-۱۰ تأثیر غلتک کاری پس از جوشکاری روی تنش‌های پسماند جوش نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که با افزایش بار اعمالی، تنش پسماند کششی در گرده جوش (که در حدود تنش تسلیم است) تا حدود 300 MPa - کاهش یافته است.



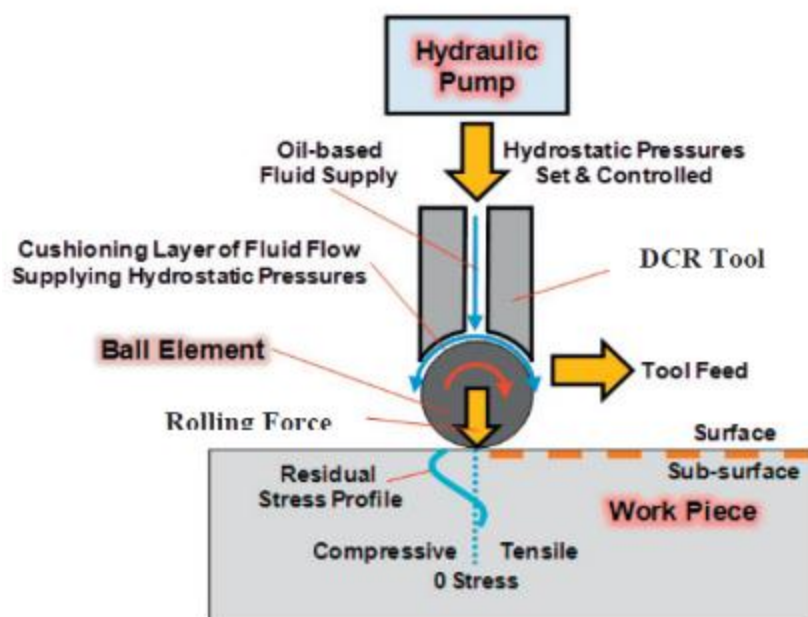
شکل ۳-۹: تجهیزات غلتک‌زنی حین جوشکاری [۲۴]



شکل ۳-۱۰: تأثیر فرایند غلتک‌کاری و بار اعمالی بر تنش پسماند جوش [۲۴]

۵-۳- Deep Cold Rolling روش

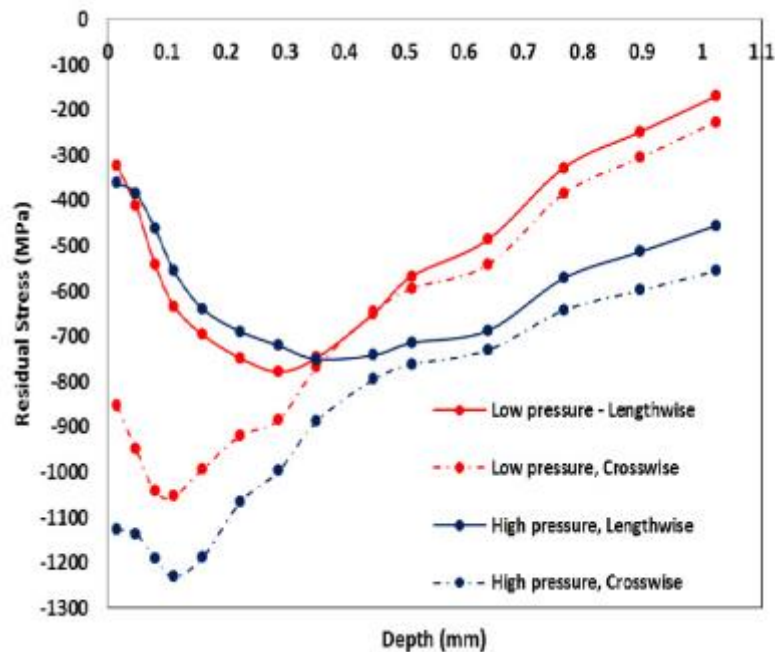
در این روش با استفاده از یک گوی فلزی که فشار قابل توجهی به سطح اعمال کرده و روی سطح حرکت می‌کند، به جسم نیروی فشاری وارد شده و سطح جسم را وارد ناحیه پلاستیک می‌کند. در این روش عمق تنش پسماند ایجاد شده بالاتر از روش ساچمه‌زنی است. همچنین برخلاف روش ساچمه‌زنی سبب افزایش زبری سطح نشده و زبری سطح را کمتر می‌کند. در شکل زیر شماتیک این روش نمایش داده شده است.



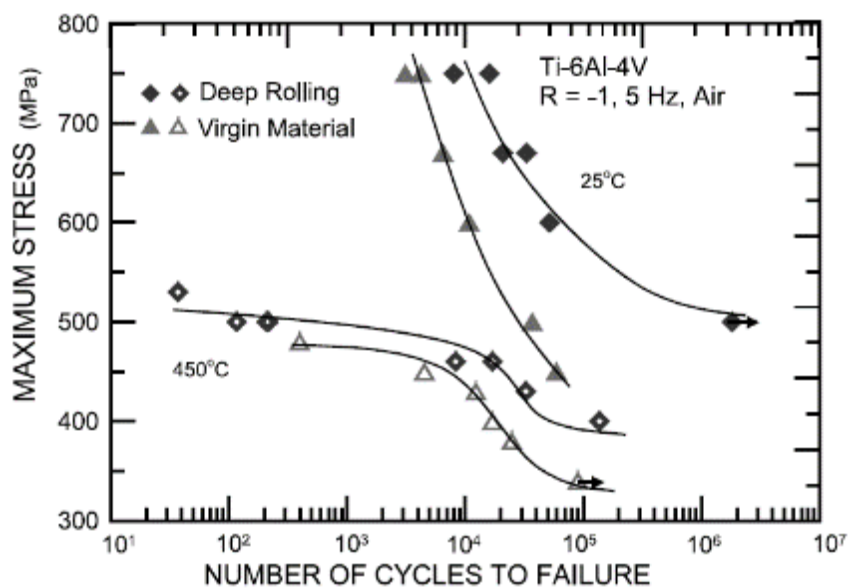
شکل ۳-۱۱: شماتیک روش Deep Cold Rolling [۲۵]

Wong و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر روش Deep Cold Rolling بر ایجاد تنش پسماند فشاری در آلیاژ پایه تیتانیومی Ti 6Al-4V پرداختند [۲۵]. این آلیاژ کاربرد زیادی در صنعت هوایی و در توربین‌ها دارد. در این تحقیق با استفاده از یک ربات صنعتی روی سه مدل نمونه متفاوت (به لحاظ هندسه) روش DCR انجام گرفت. برای یکی از نمونه‌ها که بهترین عملکرد را داشت، حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای دو حالت فشار زیاد و فشار کم تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شد. همچنین برای حالتی که جهت حرکت در راستای چرخش گوی (Lengthwise) و جهت حرکت عمود بر چرخش گوی (Crosswise) آزمایش انجام شده است. با توجه به شکل ۳-۱۲ در حالت Crosswise و فشار بالا بیشترین تنش پسماند حاصل می‌شود.

Nalla و همکارانش [۲۶] نیز در سال ۲۰۰۳ به بررسی تأثیر روش DCR بر خستگی کم چرخه و پر چرخه آلیاژ Ti-6Al-4V پرداختند. ایشان دریافتند که روش DCR قابلیت بسیار خوبی در به تاخیر انداختن جوانه زنی و رشد ترک در دمای بالا (۴۵۰ درجه سانتیگراد) را دارد. البته باید خاطر نشان کرد که تقریباً تمام تنش پسماند در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد آزاد می‌شود. در دمای بالا، به دلیل ریز شدن ابعاد دانه‌ها در سطح و کارسختی انجام گرفته روی آن‌ها، عمر خستگی بهبود می‌یابد. در شکل ۳-۱۳ نمودار S-N مربوط به آلیاژ Ti-6Al-4V در دو دمای ۲۵ و ۴۵۰ درجه سانتیگراد و برای دو حالت ماده خام و اعمال DCR روی نمونه آورده شده است.



شکل ۳-۱۲: بررسی اثر جهت حرکت و فشار بر تنش پسماند روش DCR [۲۵]

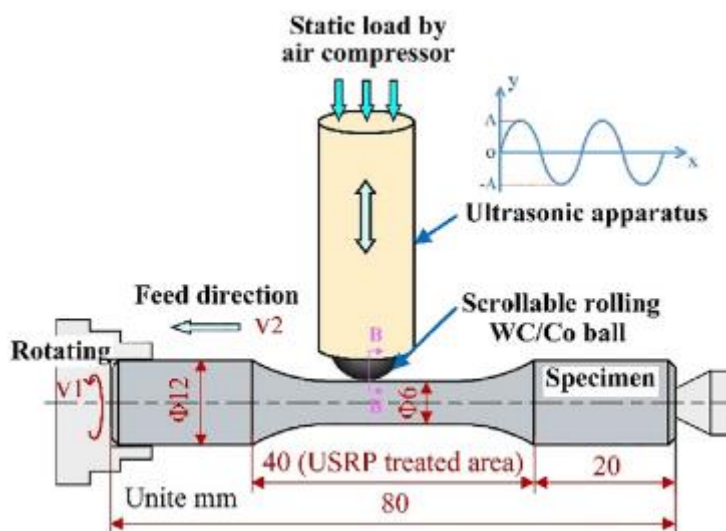


شکل ۳-۱۳: نمودار S-N مربوط به آلیاژ Ti-6Al-4V در دو دمای ۲۵ و ۴۵۰ درجه سانتیگراد و برای دو حالت ماده خام و اعمال DCR [۲۶]

۳-۶- روش Ultrasonic surface rolling process (USRP)

این روش برخلاف روش ساچمه‌زنی سبب کاهش زبری سطح شده و تنش پسماند فشاری با عمق بالاتری ایجاد می‌کند. علاوه بر این ساختار کریستالی بسیار ریز و حتی نانوکریستال در سطح قطعه ایجاد می‌کند. تحقیقات مختلف نشان داده است که این روش سبب بهبود خوردگی [۲۷]، سایش [۲۷، ۲۸] و عمر خستگی [۲۹-۳۱] می‌شود.

در مرجع [۳۲] روش USRP روی Ti-6Al-4V که در ماده پره توربین‌های گازی است، مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به کاربرد بسیار زیاد این ماده در صنعت نیروگاهی، نتایج این تحقیق با تفصیل بیشتری شرح داده می‌شود. در شکل ۳-۱۴ ابعاد نمونه مورد استفاده در تست خستگی و همچنین طریقه انجام USRP نمایش داده شده است. در جدول ۳-۲ نیز پارامترهای مربوط به USRP آورده شده است. BM بیانگر Base Material بوده که حالت بدون USRP را نشان می‌دهد و R1 بیانگر انجام USRP برای یک مرتبه، R3 برای سه مرتبه و به همین طریق R6 و R12 برای ۶ و ۱۲ مرتبه انجام USRP است. در این تحقیق تأثیر USRP بر ابعاد دانه‌ها در سطح ماده، زبری سطح، عیوب سطح، سختی سطح، عمر خستگی و تنش پسماند مورد بررسی قرار گرفته است.



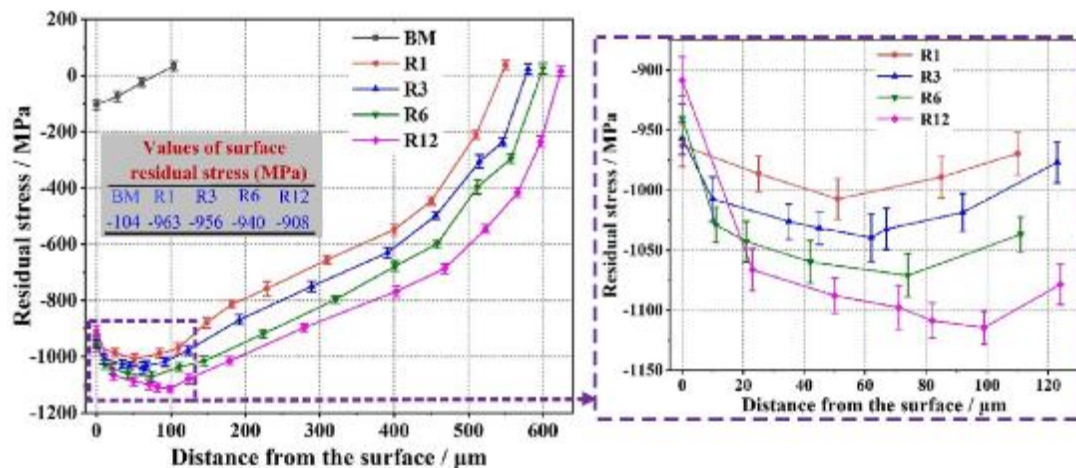
شکل ۳-۱۴: ابعاد هندسی نمونه استفاده شده و شماتیکی از USRP [۳۲]

جدول ۳-۲: پارامترهای اساسی استفاده شده در USRP [۳۲]

Specimens	BM	R1	R3	R6	R12
Lathe rotational speed v1 (rev/min)	—			120	
Feeding rate v2 (mm/rev)	—			0.1	
Static load (N)	—			600	
Ultrasonic vibration amplitude (μm)	—			10	
Ultrasonic vibration frequency (kHz)	—			20	
Repeated processing number	—	1	3	6	12

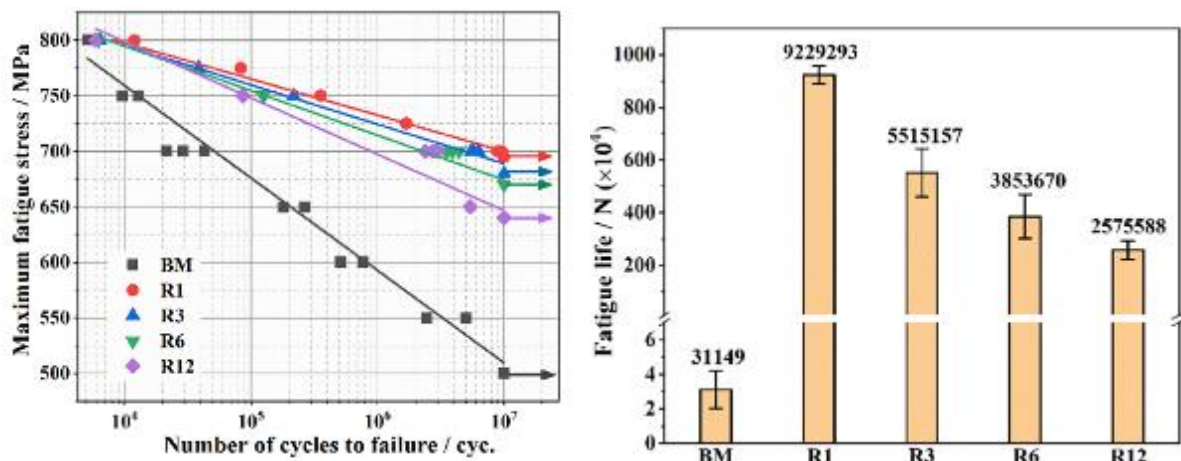
با انجام USRP و همچنین با افزایش تعداد دفعات تکرار آن، دانه‌های ریزتری در سطح نمونه تشکیل می‌شود به گونه‌ای در حالت R12 ابعاد دانه‌های سطح به ۱۰۰-۴۰۰ nm رسیده است. زبری سطح با انجام USRP بهبود یافته اما با افزایش تعداد تکرار آن، زبری سطح افزایش می‌یابد و بهترین کیفیت سطح مربوط به R1 است. با افزایش تعداد دفعات تکرار، میکروآسیب‌ها در سطح ماده افزایش خواهد یافت به گونه‌ای که در R12 می‌توان میکروترک‌ها را مشاهده کرد. با انجام USRP میکروسختی در نزدیکی سطح افزایش چشمگیری پیدا می‌کند و با افزایش تعداد تکرار، سختی بیشتر می‌شود.

به کمک USRP تنش پسماند فشاری بسیار بالایی در سطح ماده و تا عمق ۰/۶ mm ایجاد می‌شود. بالاترین تنش پسماند فشاری در حالت R1 رخ می‌دهد. البته اگر سطح جسم را در نظر بگیریم، با افزایش تعداد تکرارها، اندازه تنش پسماند فشاری افزایش پیدا می‌کند. به گونه‌ای که در عمق حالت R12 تنش پسماند فشاری بالاتری نتیجه می‌دهد. در شکل ۳-۱۵ کانتورهای تنش پسماند برای تعداد دفعات تکرار مختلف و بر حسب فاصله از سطح نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۵: کانتورهای تنش پسماند برای تعداد دفعات تکرار مختلف در روش USRP [۳۲]

نتایج تست خستگی بیانگر بهبود چشمگیر عمر خستگی با اعمال USRP با تعداد تکرارهای مختلف است. البته با افزایش تعداد تکرارها، بهبود عمر خستگی اندکی کاهش می‌یابد و بهترین عملکرد در آزمون خستگی مربوط به نمونه R1 است. در این نمونه، تنش حد دوام ۳۹٪ بالاتر از فلز پایه است.



نمودار S-N با انجام USRP

عمر خستگی برای تنش ۷۰۰ MPa

شکل ۳-۱۶: تأثیر USRP بر عمر خستگی آلیاژ Ti-6Al-4V [۳۲]

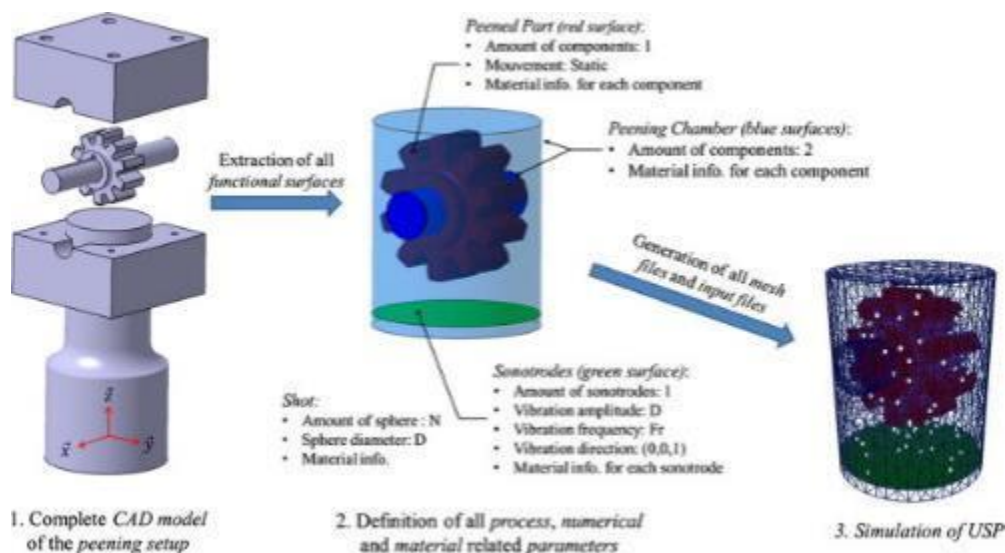
۳-۷- ساچمه زنی آلتراسونیک

ساچمه زنی آلتراسونیک بسیار مشابه با ساچمه‌زنی سنتی است. در اینجا برخلاف روش ساچمه زنی سنتی که در آن از جریان باد، گرانش یا دوران یک توربین برای پرتاب ساچمه‌ها استفاده می‌شود، یک سطح مرتعش به نام sonotrode که با فرکانسی در حدود ۲۰ kHz ارتعاش می‌کند به کار گرفته شده است. در این روش جریان الکتریکی وارد یک مبدل پیزوالکتریک می‌شود

و تبدیل به نیروی مکانیکی می‌شود. در اینجا از تقویت کننده‌هایی نیز برای افزایش دامنه ارتعاشات و در نتیجه بهبود انرژی مکانیکی بهره می‌برند.

در کاربردهای حساس که در آن‌ها نیاز به تنش فشاری با عمق زیاد است و همچنین نیاز به یک سطح صاف پس از ساچمه‌زنی وجود دارد روش ساچمه‌زنی آلتراسونیک نتیجه بسیار مطلوبی می‌دهد. با توجه به بسته بودن فضا و همچنین ارتعاش مداوم ساچمه‌ها، در این روش تنها نیاز به تعداد محدودی ساچمه است. در نتیجه ساچمه با بالاترین کیفیت و بیشترین میزان کروی بودن مورد استفاده قرار می‌گیرد و به همین جهت است که کمترین زبری در این روش ایجاد می‌شود. برای نمونه با روش ساچمه‌زنی آلتراسونیک روی ماده TA6V زبری سطح در حدود $0.3\mu\text{m Ra}$ ایجاد می‌شود در حالیکه با روش ساچمه‌زنی سنتی زبری سطح در حدود $3\mu\text{m Ra}$ است.

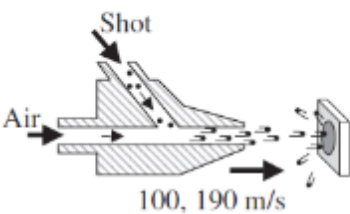
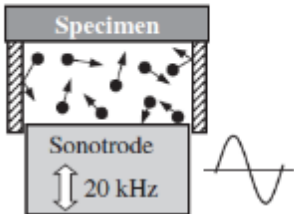
در این روش جسم باید در یک محیط بسته قرار بگیرد و صفحه sonotrode در بالا یا پایین آن باشد. برای نمونه در شکل زیر، چرخ دنده با استفاده از فیکسچر نشان داده شده در سمت چپ شکل، در یک فضای بسته محبوس می‌شود. صفحه دایره‌ای زیر چرخ‌دنده صفحه sonotrode است. تنها چند گرم ساچمه روی آن قرار می‌گیرد و سپس با ارتعاش این صفحه ساچمه‌ها با فرکانس و سرعت بالایی به سمت جسم پرتاب می‌شوند. تمام این پروسه در شکل ۳-۱۷ نمایش داده شده است.

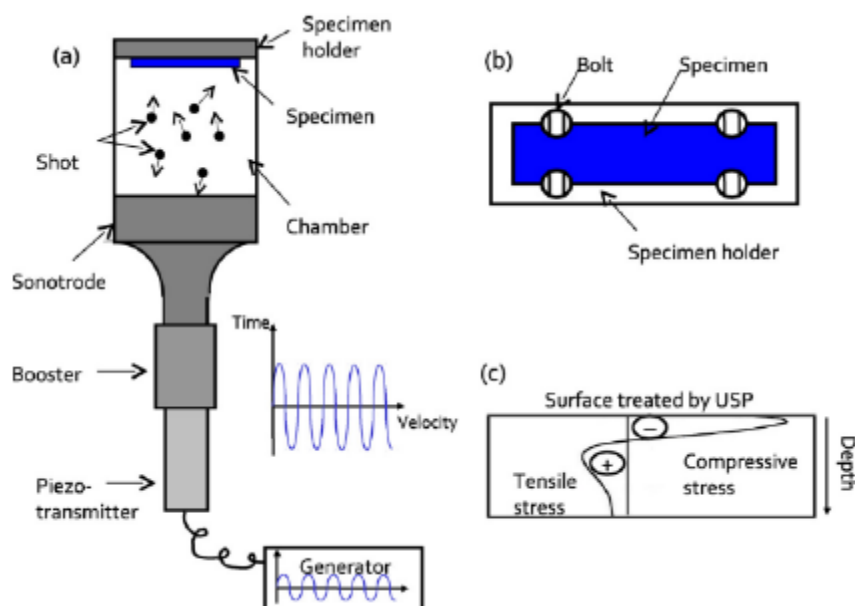


شکل ۳-۱۷: شماتیکی از مراحل روش ساچمه زنی آلتراسونیک [۳۳]

ساچمه‌های استفاده شده در روش ساچمه‌زنی آلتراسونیک دقت ساخت بسیار بالاتری داشته و سایز آن‌ها نیز بزرگتر است. همچنین با توجه به استفاده دائم از ساچمه‌ها در حین فرایند ساچمه زنی آلتراسونیک و عدم نیاز به حجم زیادی از ساچمه زمان انجام این فرایند را معمولاً مقداری بالاتر لحاظ می‌کنند که در نتیجه آن نرخ پوشش در این روش بالاتر رفته و عموماً بالاتر از روش ساچمه‌زنی است. در جدول زیر دو روش ساچمه‌زنی آلتراسونیک و ساچمه‌زنی با جریان هوا با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اجزای تشکیل دهنده دستگاه ساچمه زنی آلتراسونیک در شکل ۳-۱۸ نمایش داده شده است.

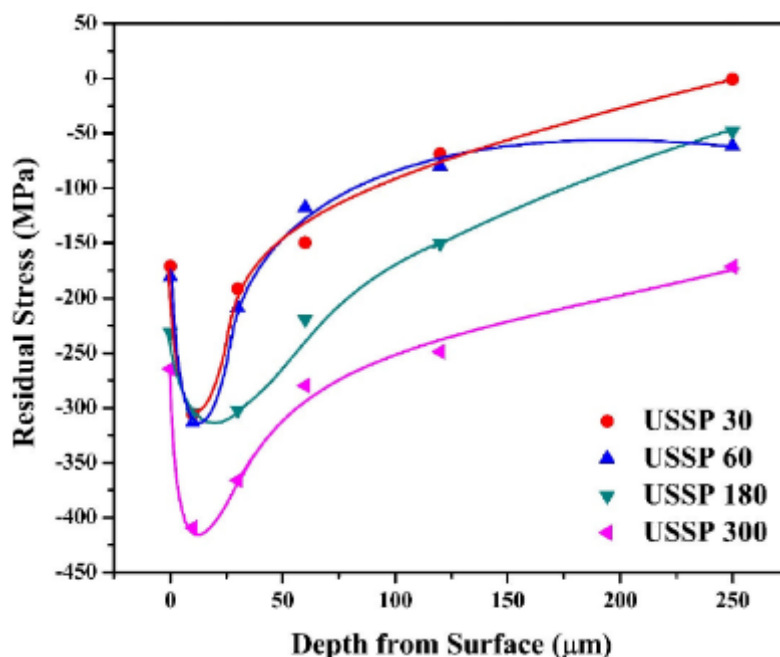
جدول ۳-۳: مقایسه دو روش ساچمه زنی آلتراسونیک و ساچمه زنی با جریان هوا [۳۴]

Air blast shot peening		Ultrasonic shot peening
	Schematic illustration of equipment	
ϕ 0.05, 0.3 mm	Shot size	ϕ 0.4 mm
High (> 100 m/s) Velocity distribution - Small	Shot velocity	Low (< 20 m/s) Velocity distribution - Large
Single-direction ($\sim 90^\circ$)	Impact direction	Multi-direction
100, 170 % / s	Coverage rate	20 % / s



شکل ۳-۱۸: اجزای تشکیل دهنده دستگاه ساچمه زنی آلتراسونیک [۳۵]

شبیه سازی المان محدود روش ساچمه زنی آلتراسونیک در مراجع [۳۶, ۳۵] انجام پذیرفته است. با استفاده از روش ساچمه زنی آلتراسونیک می توان سطح ماده را تبدیل به نانوکریستال کرد. در تحقیق انجام گرفته توسط Liu و همکارانش [۳۷] که روی فولاد ضد زنگ 316L انجام گرفته است، یک لایه نانوکریستال به ضخامت ۵ میلی متر و با متوسط ابعاد دانه ۱۰ نانومتر با روش ساچمه زنی آلتراسونیک ایجاد شد. در عمق ۵ تا ۳۰ میلیمتری، ابعاد دانه با ابعاد ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتری مشاهده می شود. افزایش زمان ساچمه زنی آلتراسونیک نیز تأثیر چندانی روی ابعاد دانه ها نگذاشته است اما ضخامت لایه نانوکریستال را افزایش می دهد. ایجاد ساختار نانوکریستال به سبب افزایش چگالی نابجایی ها و همچنین تشکیل باندهای برشی می باشد.



شکل ۳-۱۹: تأثیر زمان انجام فرایند ساچمه زنی آلتراسونیک بر تنش پسماند آلومینیوم AA7075 [۳۸]

یکی از روش‌های ارتقا خواص مکانیکی یک جسم و به خصوص بهبود عمر خستگی، سایش و خوردگی انجام عملیات‌های خاصی روی سطح جسم به منظور کاهش ابعاد کریستال‌ها تا مقیاس نانومتری است. طبق قانون Hall-Petch با کوچک شدن سایز دانه‌ها، سختی جسم افزایش پیدا می‌کند. برای همین منظور روش‌های مختلفی جهت ریز کردن ابعاد دانه‌های سطح جسم توسعه داده شده است. یکی از این روش‌ها پوشاندن سطح جسم با یک پوشش با ابعاد دانه نانومتری است و روش دیگر اعمال نیروی مکانیکی بسیار شدید جهت کوچکتر کردن سایز دانه‌ها در سطح می‌باشد. در روش اول چسبندگی پوشش به زمینه بسیار مهم بوده و جزو عوامل محدود کننده می‌باشد. در اینجا تمرکز بر روش‌هایی است که با استفاده از تغییر شکل پلاستیک بسیار شدید^۷ ابعاد دانه‌ها در سطح را کاهش می‌دهند. در جدول ۳-۴ سختی، ابعاد دانه و ضخامت لایه نانوکریستال شده فلزات مختلف با اعمال روش SMAT و در جدول ۳-۵ نیز تأثیر روش SMAT بر تنش تسلیم و تنش نهایی چند آلیاژ پر کاربرد آورده شده است [۳۹].

⁷ severe plastic deformation

جدول ۳-۴: سختی، ابعاد دانه و ضخامت لایه نانوکریستال شده فلزات مختلف با اعمال روش SMAT [۳۹]

Material	Microhardness (GPa)	Grain Size (nm)	NS Layer Thickness (μm)	Treatment duration (mins)
316L	4.5	<100	40	15
Stainless	4.0	10	10	–
Steel	4.5	40	0.5	30
	4.6	20–50	20	5–30
	4.45	10	10–100	15
Borided H13 Steel	HV only: 1650	8	20	40
ss400 carbon steel	314 HV	12.7	–	15
Nitrided 321 Stainless Steel	HV only: 1420	–	40	30
Nickel Alloy	5.8–6.3	5–40	50	180
	Nanohardness only: 12	20	10–30	60
Magnesium Alloy	1.9	30 $\pm$ 5	100	5–60
	HV only: 270	50–100	0–10	30
	HV only: 250	50	0–10	30
	HV only: 434	–	–	–
Titanium	3.8	<100	50	30
Iron	3.8	12	0–15	60
Copper	1.3	<100	25	30

جدول ۳-۵: تأثیر روش SMAT بر تنش تسلیم و تنش نهایی [۳۹]

Material	Yield strength MPa	Ultimate tensile strength MPa	Treatment duration mins	Treatment
316L	250	600	–	–
stainless steel (CG)	300	650	–	–
316L	665	750	15	SMAT
stainless steel (nc)	725	784	30	SMAT
	1450	1550	30	SMAT
Titanium (CG)	400	440	–	–
Titanium (nc)	920	970	30	SMAT
Ti-6Al-4V (CG)	880	950	–	–
Ti-6Al-4V (nc)	902	975	–	SMAT
Copper (CG)	70	220	–	–
Copper (nc)	470	480	5	SMAT
	410	430	30	SMAT

۳-۸- Low Plasticity Burnishing روش

روش Low-plasticity burnishing (LPB) به عنوان روشی مقرون به صرفه برای ایجاد تنش های پسماند فشاری به سطح قطعات فلزی (به ویژه اجزای توربین) توسعه یافته است تا عمر خستگی آنها افزایش یابد. پیش از این، تنش های فشاری

سطحی برای افزایش عمر خستگی توسط روش‌هایی مانند ساچمه زنی یا لیزر پینینگ ایجاد می‌شد. اما متأسفانه به دلیل آسایش تنش حرارتی، بخش بسیار زیادی از این تنش پسماند فشاری از بین رفته و در نتیجه عمر خستگی جسم کاهش می‌یابد. به همین جهت نیاز است که روشی مورد استفاده قرار بگیرد که در دماهای بالا نیز تنش پسماند آن حفظ شود.

در روش LPB یک گوی کروی مسطح به سطح فشرده می‌شود و این گوی با چرخش خود روی سطح سبب پرداخت سطح می‌شود. گوی باید سخت بوده و مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته بالایی نیز داشته باشد. برای اطمینان از گردش آزاد گوی، گوی در یک محفظه‌ای از روغن غلتان است و تماس مستقیم با محفظه ندارد. نیروی وارده از طرف گوی به اندازه‌ای است که می‌تواند سبب تغییر شکل سطح ماده شده و یک لایه فشاری روی سطح ایجاد می‌کند و تنش‌های کششی روی سطح را از بین می‌برد. ابزار مورد نیاز LPB را می‌توان با استفاده از ابزار CNC روی سازه‌های مختلف اعمال کرد. روش LPB محدود به سطوح مسطح نبوده و قابلیت اجرا روی سطوح پیچیده را نیز دارد. با کد نویسی برای دستگاه CNC و حرکت چند محوره ابزار آن امکان جاروب کردن کل سطح توسط ابزار وجود دارد.

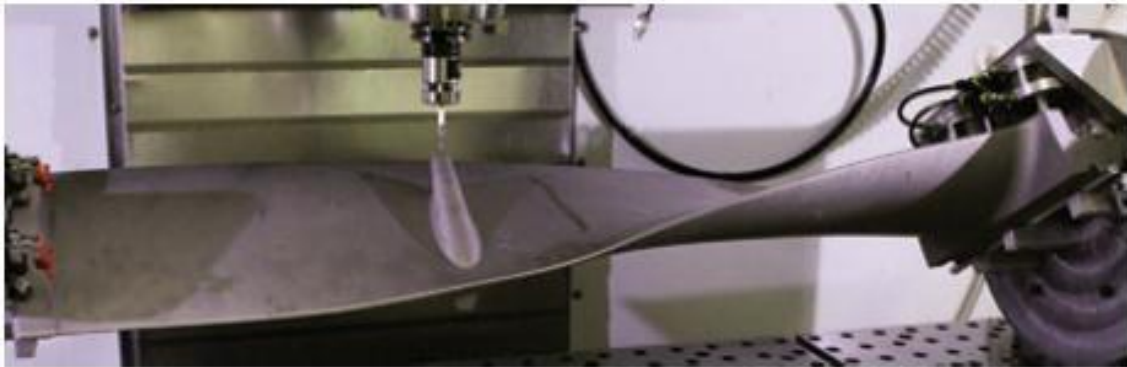
روش LPB حداقل کارسختی را ایجاد می‌کند و نسبت به روش‌هایی مانند ساچمه زنی و لیزر پینینگ مقاومت بهتری نسبت به آسایش تنش حرارتی در دمای بالا دارد که نتیجه آن ماندگاری بیشتر تنش فشاری در سطح سازه و متعاقباً افزایش عمر خستگی و به تاخیر انداختن رشد ترک‌های موجود است. LPB هزینه کمتری نسبت به لیزر پینینگ داشته و در حدود یک دهم هزینه لیزر پینینگ هست و تنش پسماند فشاری عمق و پایداری بالاتری نسبت به ساچمه زنی دارد.

این روش در ابتدا در آزمایشگاه Lambda و توسط Paul S. Prevey انجام گرفت. مزیت اصلی روش LPB قابلیت تکرار آن است. از آنجایی که این روش توسط CNC انجام می‌شود و حرکت دستگاه نیز به صورت کدنویسی است این اطمینان وجود دارد که تمام سطح قطعه توسط ابزار جاروب شده و هیچ بخشی از جسم حاوی تنش کششی نخواهد بود. از طرفی تمام پارامترهای موثر در این روش قابلیت تکرار داشته و هیچ پارامتری تصادفی نیست. در روش ساچمه‌زنی برای اطمینان از اینکه کل سطح تحت تأثیر ساچمه‌ها قرار می‌گیرد معمولاً از Coverage بالا استفاده می‌شود (معمولاً ۲۰۰٪ و ۴۰۰٪). با این حال امکان دارد که بخشی از سطح چندین بار و برخی از نقاط دیگر تنها یکبار توسط ساچمه‌ها مورد اصابت قرار گیرد.

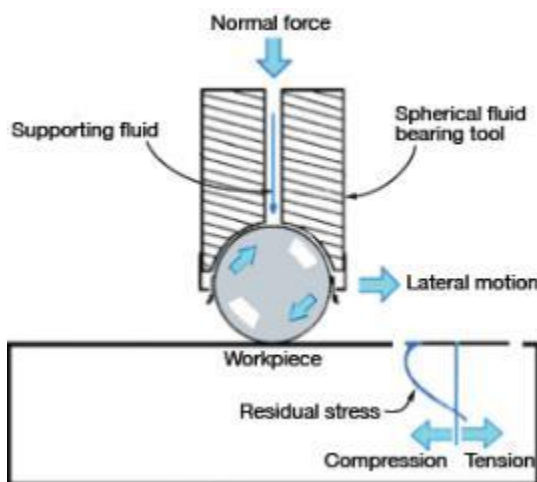
همچنین برخلاف روش ساچمه‌زنی که در اثر آن زبری سطح افزایش می‌یابد در روش LPB زبری سطح کاهش یافته و سطح کاملاً صیقلی می‌شود. روش LPB تاکنون به عنوان یک روش موثر در تعمیر و نگهداری اجزای نیروگاه سیکل ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از موارد استفاده از این روش در کاربرد نیروگاهی عبارتند از:

- آسیب فرسایش پره های R0 کمپرسور توربین گازی 7FA و 9FA
- آسیب ناشی از جسم خارجی روی هفتمین ردیف پره های کمپرسور توربین گازی 501F
- آسیب تمرکز تنش اولین ردیف پره های کمپرسور در توربین گازی Taurus 70
- آسیب فرسایش ناشی از رطوبت و خستگی پرچرخه پره‌های توربین بخار فشار پایین
- آسیب fretting روی پیچ‌های روتور توربین گازی کلاس 501G

در ادامه و در شکل‌های ۳-۲۰ الی ۳-۲۲ کاربرد این روش برای پره توربین‌های بخار و گاز نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۰: تعمیر پره توربین بخار فشار پایین با روش LPB در سایت



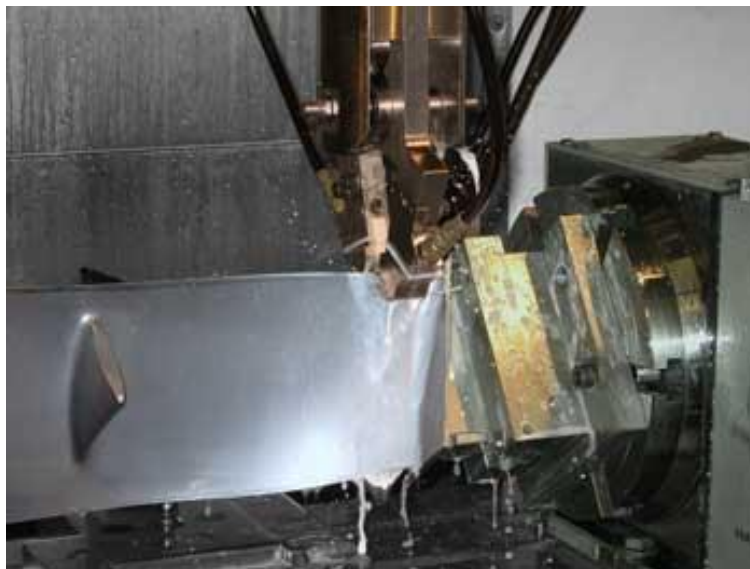
شکل ۳-۲۱: چپ: ابزار LPB تک نقطه و راست: اعمال LPB روی ایرفویل 7F R0



شکل ۳-۲۲: فرایند LPB روی فولاد ضد زنگ پره های مرحله اول کمپرسور توربوفن

روش LPB موفق به کسب جایزه R&D 100 Award برای ایده انقلابی در علم و تکنولوژی و جایزه NASA Hallmark of Success از ناسا را دریافت کرده است [۴۰]. یکی از ویژگی‌های روش LPB قابلیت اعمال آن روی سطوح با

ضخامت بسیار کم مانند لبه پره توربین گاز (یا بخار) است. در شکل ۳-۲۳ طریقه اعمال این روش روی لبه یک پره توربین نمایش داده شده است. در جدول ۳-۶ قابلیت‌های این روش با روش‌های دیگر بهبود سطح مقایسه شده است.



شکل ۳-۲۳: اعمال روش LPB روی لبه پره توربین گاز

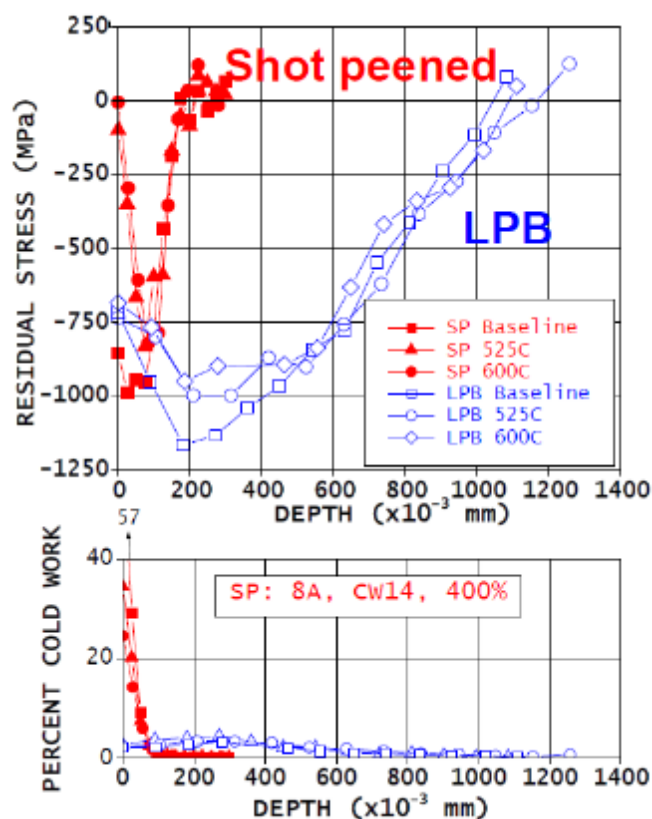
جدول ۳-۶: مقایسه قابلیت‌های روش LPB با روش‌های دیگر ایجاد تنش پسماند فشاری [۴۰]

	Low Plasticity Burnishing (LPB)	Controlled Plasticity Burnishing (CPB)	Controlled Impact Burnishing (CIB)	Laser Shock Peening (LSP)	Deep Rolling	Shot Peening
Process Type	Burnishing	Burnishing	Peening	Peening	Burnishing	Peening
Deep Compression	X	X	X	X	X	
Stable Compression In Harsh Environments	X		X	X		
Smooth Finish	X	X			X	
Applied with CNC Machine Tools/Robots	X	X	X	X	X ¹	X
100% Continuous, Closed-Loop Monitoring	X	X	X			
Single Cycle Processing	X	X	X	*		
Applicable to Difficult Geometries	X	X	X	X		X
Ability to Apply Varying Designed Residual Compression	X ²	X	X			

* Requires multiple passes to achieve full coverage.
¹ Generally applied using lathes
² Tailored to applied stresses with high resolution

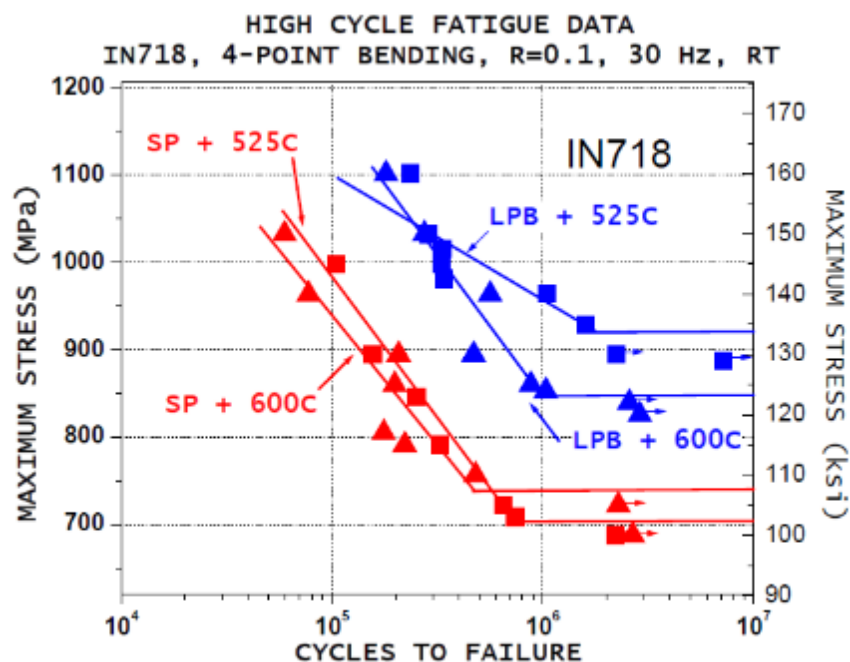
Prevéy و همکارانش در مقالات متعددی به بررسی کارایی روش LPB پرداخته‌اند. در شکل زیر تأثیر دمای کاری ۵۲۵ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد بر تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده توسط روش LPB روی آلیاژ IN718 نمایش داده شده است. برای این منظور نمونه‌ها به مدت ۱۰۰ ساعت در دماهای ذکر شده نگه داشته شده‌اند. در روش ساچمه‌زنی کار سرد بسیار بالایی

ایجاد می‌شود و متعاقباً تنش‌های پسماند در دمای بالا به سرعت به سمت صفر می‌روند. اما در روش LPB به دلیل کار سرد بسیار کمتر، دمای کاری بالا تأثیر ناچیزی بر آسایش تنش ناشی از حرارت دارد. پایداری حرارتی بالا در روش LPB به دلیل چگالی کم نابجایی و در نتیجه آنیل شدن محدود نابجایی‌ها در دمای بالا است.



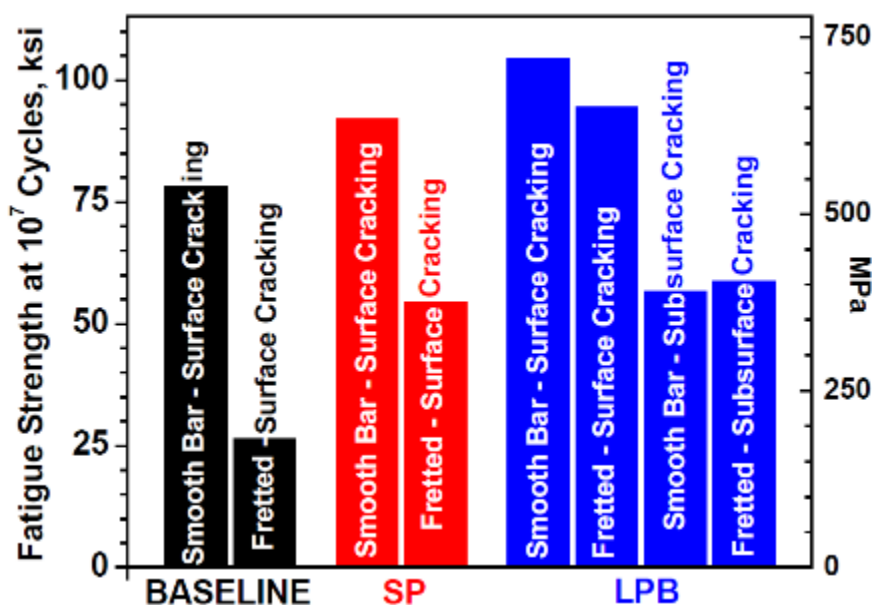
شکل ۳-۲۴: تأثیر دمای کاری بالا بر تنش‌های پسماند روش LPB [۴۱]

در شکل زیر عملکرد روش LPB و ساچمه زنی بر خستگی پرچرخه IN718 در دمای بالا با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به این شکل کاملاً مشخص است که روش LPB عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش ساچمه زنی در بهبود عمر خستگی دارد که دلیل آن آسایش تنش قابل توجه در روش ساچمه زنی تحت دمای بالا است.



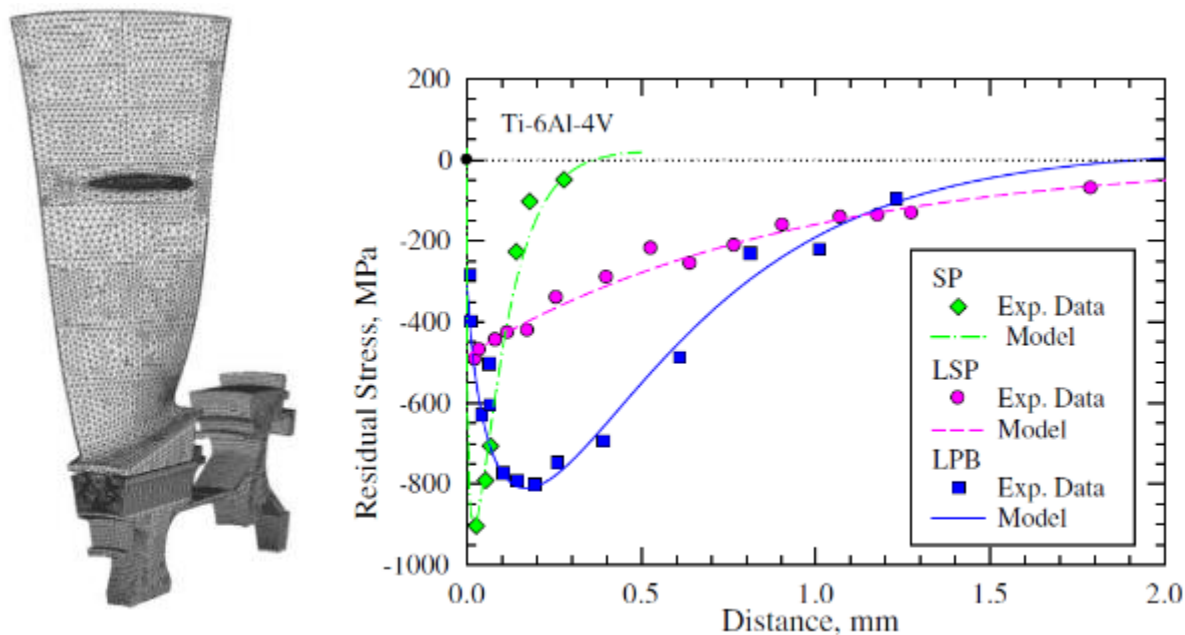
شکل ۳-۲۵: عملکرد روش LPB و ساچمه زنی بر خستگی پرچرخه IN718 در دمای بالا [۴۱]

خستگی سایشی هنگامی اتفاق می‌افتد که سطوحی که با یکدیگر در تماس و تحت بار هستند حرکت نسبی کوچکی نسبت به یکدیگر داشته باشند. در این حالت ترک‌های خستگی در مود I رشد کرده و سبب آسیب کلی در سازه می‌شوند. آزمون خستگی سایشی روی آلیاژ Ti-6Al-4V انجام پذیرفت و اثر دو فرایند LPB و ساچمه زنی روی آن مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمون تنش تماسی ۴۶۲ MPa و $R=0.1$ به نمونه‌ها اعمال شد. مقاومت خستگی برای ۱۰^۷ سیکل ۵۳۸ MPa بود که تحت اثر خستگی سایشی به ۱۷۲ MPa کاهش یافت. در نمونه‌هایی که روی آن عملیات ساچمه زنی صورت پذیرفته بود، مقاومت خستگی به ۳۸۰ MPa افزایش یافت که بهبود چشمگیری می‌باشد. با اعمال LPB تقریباً تفاوتی بین نمونه بدون سایش خستگی و با سایش خستگی مشاهده نمی‌شود اما در دو عدد از نمونه‌ها که در تنش‌های بسیار بالا مورد آزمایش قرار گرفته بودند، ترک‌ها از زیر ناحیه فشاری ایجاد و رشد کردند.



شکل ۳-۲۶: داده های خستگی سایشی Ti-6Al-4V برای ماده زمینه، فرایند ساچمه زنی و LPB [۴۱]

Chan و همکارانش [۴۲] نیز به بررسی روش های مختلف اعمال تنش پسماند فشاری بر خستگی سایشی دیسک موتور توربین گازی پرداختند. جنس این دیسک از Ti-6Al-4V است. برای این منظور المان محدود و نتایج تجربی مورد استفاده قرار گرفته اند. در شکل زیر مدل المان محدود و همچنین تأثیر فرایندهای مختلف روی آلیاژ Ti-6Al-4V نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۷: مدل المان محدود و مقایسه سه روش اعمال تنش پسماند فشاری روی آلیاژ Ti-6Al-4V [۴۲]

روش Controlled Plasticity Burnishing (CPB) نوع دیگری از روش LPB است که در آن کارسختی نسبتاً بالایی روی سطح ایجاد می شود. با این روش تنش پسماند فشاری تا عمق حدوداً 0.05 in (1.27 mm) از سطح سازه ایجاد می کند. همچنین سختی سطح را افزایش، زبری را کاهش و مقاومت به سایش را بهبود می بخشد [۴۳].

۳-۹- روش آلتراسونیک پینینگ

۳-۹-۱- کلیات روش

آلتراسونیک پینینگ^۸ یکی از معتبرترین روش های عملیات سرد روی مواد فلزی و خصوصاً روی جوش ها است. این روش در تمام صنایعی که نیاز به مقاومت بالای مواد، عمر خستگی، مقاومت به خوردگی و سایش بالا دارند مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش نوسان با دامنه کم اما با فرکانس بسیار بالا توسط یک تعداد پین استوانه ای به سطح فلز اعمال می شود و سبب ایجاد تنش پلاستیک در سطح ماده می شود. این تنش پلاستیک سبب کاهش سایز دانه، بهبود ریزساختار و بسته شدن میکرو

^۸ Ultrasonic Peening Treatment (UPT)

ترک‌ها می‌شود. با این کار، تنش‌های پسماند کششی در سطح حذف شده و یک لایه تنش پسماند فشاری در سطح ماده ایجاد می‌شود و در نتیجه میکروسختی سطح افزایش یافته، مقاومت به خوردگی بهبود یافته و عمر خستگی افزایش می‌یابد. این روش برای اولین بار توسط Mukhanov و Golubev در سال ۱۹۵۰ ابداع شده است. عملکرد این روش بسیار مشابه با روش چکش زنی^۹ است و در هر دو روش اساس کار بر بازتوزیع تنش پسماند به وسیله حذف تنش پسماند کششی و ایجاد لایه تنش پسماند فشاری می‌باشد. تفاوت اصلی دو روش در این است که در روش چکش زنی با استفاده از یک عملگر مکانیکی پنوماتیکی با فرکانس ارتعاشات 50–1000 Hz استفاده می‌شود در حالی که در روش آلتراسونیک پینینگ از فرکانس‌های بالاتر از 20 kHz جهت ایجاد تنش پسماند فشاری استفاده می‌گردد. در روش چکش زنی نیروی اعمالی به سطح اهمیت بسیار بالایی دارد و معمولاً بالاتر از 20 kgf است. با توجه به ضربه بسیار بالای این روش، در روش چکش زنی نویز و ارتعاشات زیادی به دست اپراتور وارد شده و باعث می‌شود که انجام این روش در زاویه و جهت مناسب قدری سخت باشد. زمان مورد نیاز برای روش UPT معمولاً بسیار کمتر می‌باشد و در مقایسه با روش چکش زنی نویز بسیار کمتری داشته و کار کردن با آن بسیار راحت تر است.

روش‌های مشابه دیگری برای عملیات سرد روی مواد و تولید تنش پسماند فشاری وجود دارد که می‌توان از آن جمله، روش‌های ساچمه زنی، لیزر پینینگ و cavitation peening را نام برد. در مقایسه با این روش‌ها روش UPT هزینه کمتری داشته، قابل حمل بوده و وزن بسیار کمی دارد، قابلیت تکرارپذیری داشته، امکان اعمال آن روی جوش‌ها با هندسه‌های پیچیده وجود دارد و کار کردن با آن نیاز به آموزش زیادی ندارد.

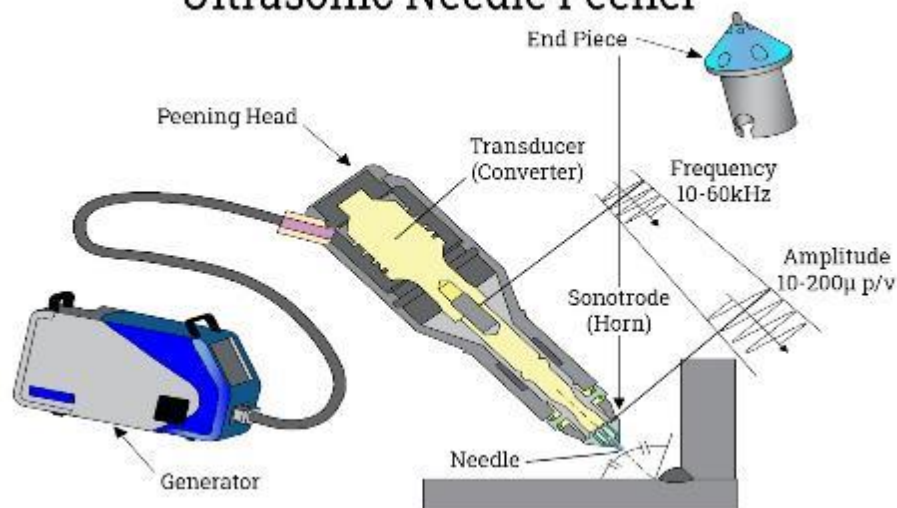
۲-۹-۳- تجهیزات روش آلتراسونیک پینینگ

تجهیزات مورد نیاز این روش در شکل ۳-۲۸ نمایش داده شده است. گان مهم‌ترین وسیله در آلتراسونیک پینینگ است که جریان الکتریکی تولید شده توسط منبع قدرت را به ارتعاش تبدیل می‌کند. با توجه به اینکه گان در اثر عملکرد نسبتاً طولانی داغ می‌شود، معمولاً از یک سیستم خنک‌کننده برای کاهش دمای گان استفاده می‌شود. مبدل ارتعاشی می‌تواند به صورت پیزوالکتریک و یا magnetostrictive باشد. پیزوالکتریک‌ها جدیدتر بوده و عملکرد بهتری دارند و همچنین سبک‌تر هستند. در مبدل‌های magnetostrictive نیاز به یک پمپ آب برای خنک‌کاری مبدل ارتعاشی است که همین امر سبب گرانتز، سنگین‌تر و پیچیده‌تر شدن آن‌ها شده است.

^۹ Hammer peening

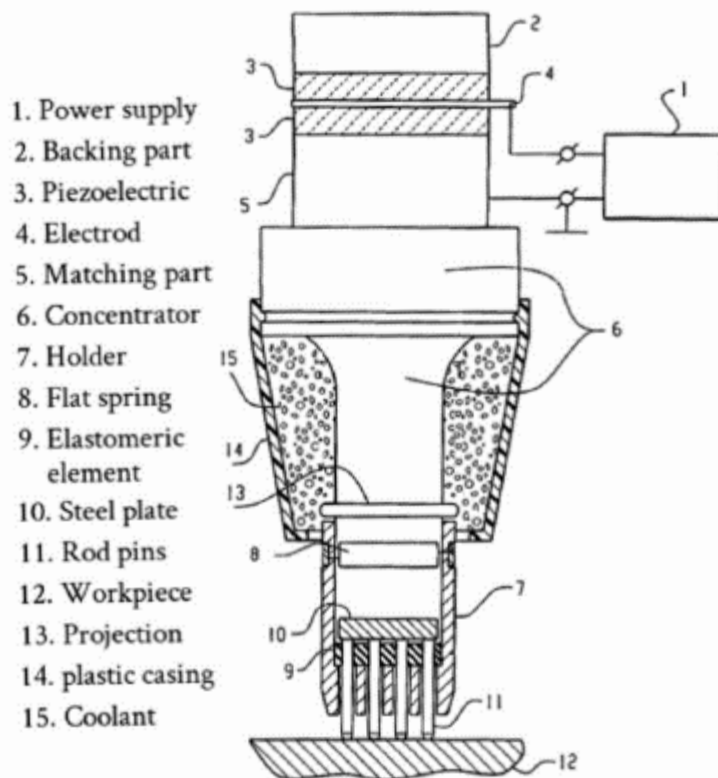


Ultrasonic Needle Peener



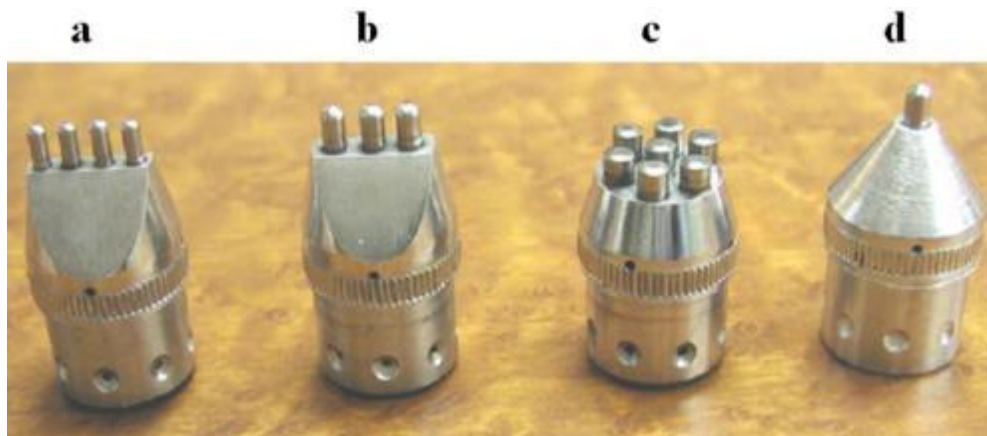
شکل ۳-۲۸: تجهیزات روش آلتراسونیک پینینگ [۴۴]

نوع پیزوالکتریک آلتراسونیک پینینگ معمولاً فرکانس 20-55 kHz، دامنه ارتعاش 20-50 μm و توان 300 W-4 kW دارند. یک نمونه از ابزار آلتراسونیک پینینگ با مبدل ارتعاشی پیزوالکتریک در شکل ۳-۲۹ نمایش داده شده است.



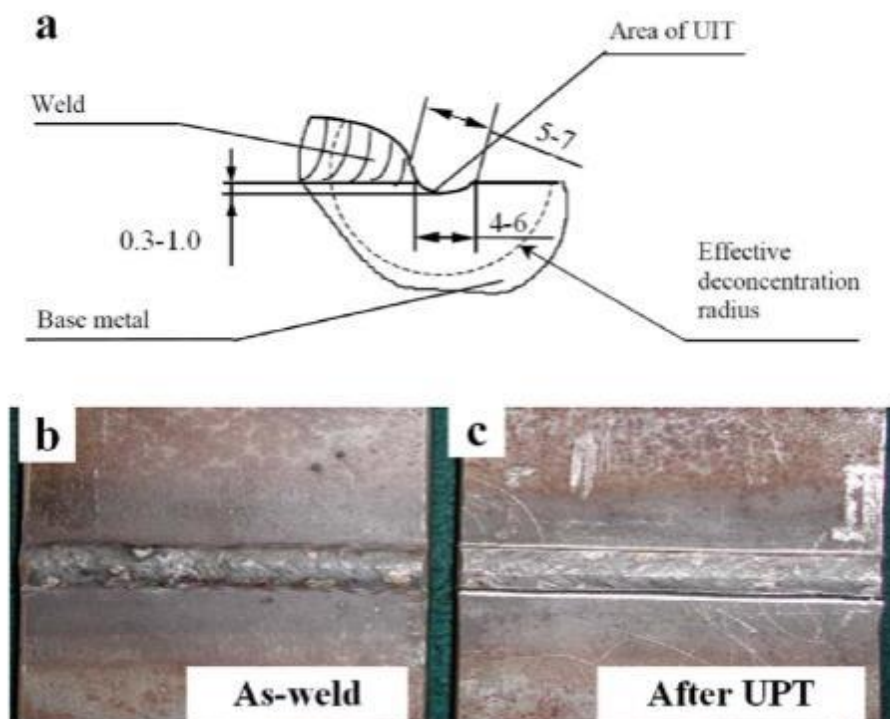
شکل ۳-۲۹: ابزار آلتراسونیک پینینگ اختراع شده توسط Prokopenko و همکارانش [۴۵]

منبع قدرت (۱) وظیفه تولید یک جریان با فرکانس و ولتاژ بسیار بالا را دارد. یک جفت از مواد پیزوالکتریک (۳) محکم به دو قطعه مکانیکی (۲) و (۵) متصل شده‌اند و بین آن‌ها الکترودها (۴) قرار گرفته است. یک متمرکز کننده مکانیکی (۶) وظیفه انتقال انرژی ارتعاشی به سر ابزار را بر عهده دارد. در سر ابزار یک نگهدارنده قرار گرفته است که در آن یک فنر تخت (۸) و یک الاستومر (۹) قرار داده شده است. توسط پین‌های قرار گرفته روی ابزار (۱۱) ارتعاشات به قطعه (۱۲) منتقل می‌شود. مایع وارد شده به ابزار هم برای خنک‌کاری و هم برای روغنکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۳۰ برخی از سرهای مختلف مورد استفاده در UPT نمایش داده شده است.



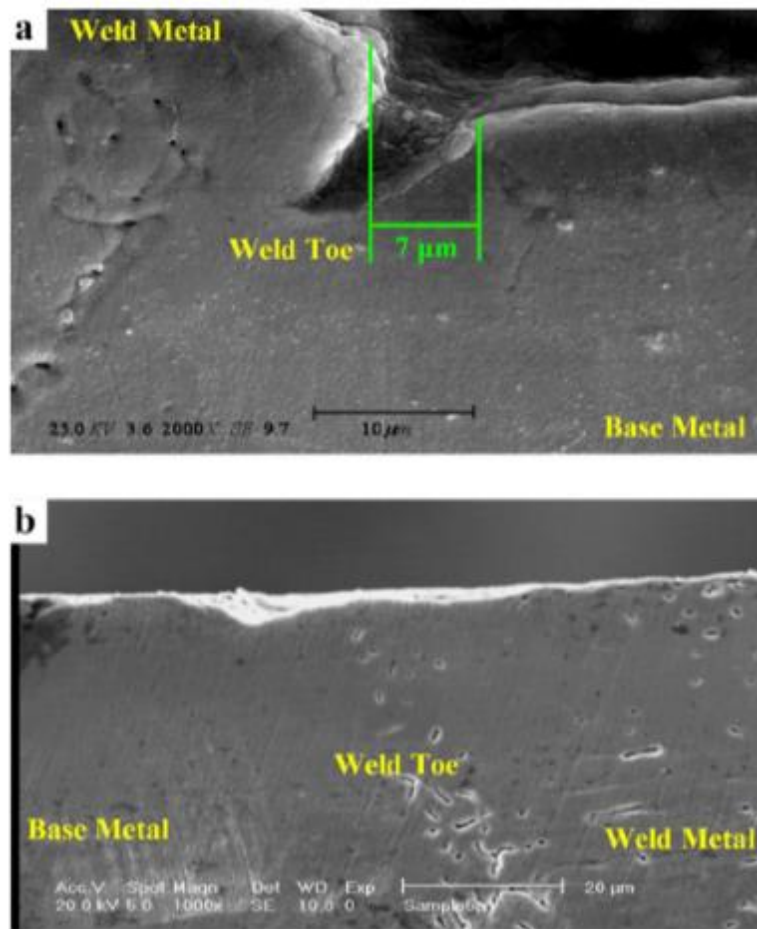
شکل ۳-۳۰: انواع مختلف سرهای UPT (a) یک سر چهار پینه با قطر پین ۳ mm، (b) یک سر سه پینه با قطر پین ۴ mm، (c) یک سر هفت پینه با قطر پین ۵ mm و (d) یک سر تک پینه با قطر پین ۴ mm [46]

اغلب از UPT برای اصلاح هندسی گرده جوش و برای ایجاد یک سطح مسطح‌تر در جوش و در ناحیه مرز مشترک جوش و زمینه استفاده می‌شود. به بیانی دیگر UPT علاوه بر ایجاد تنش پسماند فشاری با اصلاح هندسی جوش سبب کاهش تمرکز تنش در گرده جوش می‌شود. با UPT یک شیار در ناحیه ذوب شده و زمینه ایجاد می‌گردد. در شکل ۳-۳۱ شیار ایجاد شده و همچنین مسطح‌تر شدن سطح جوش با استفاده از آلتراسونیک پینینگ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۳۱: اصلاح هندسی گرده جوش توسط UPT [۴۶]

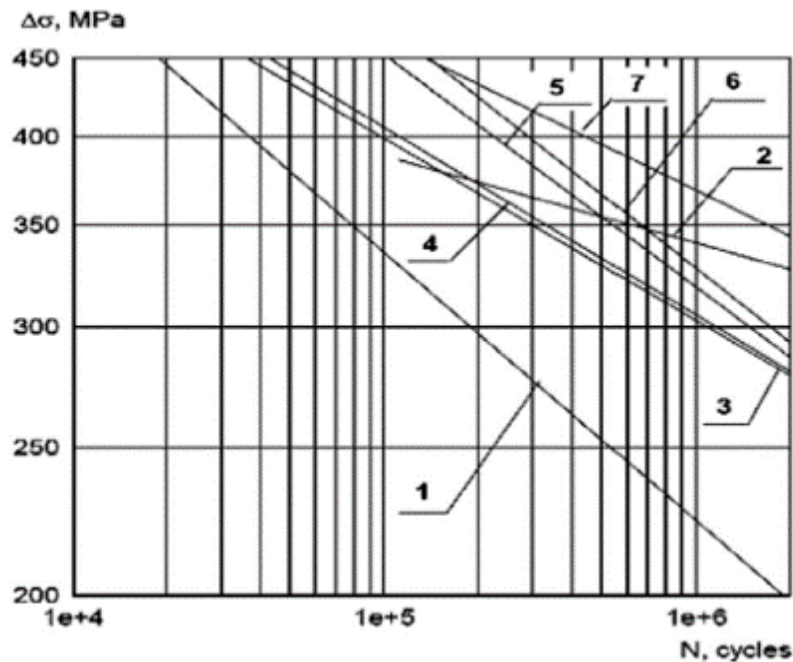
همان‌طور که در شکل ۳-۳۲ نشان داده شده است میکروترک‌های سطحی و زیرسطحی حفره‌ها و جاهای خالی با استفاده از UPT به شکل موثری بسته می‌شوند که این امر به افزایش عمر خستگی و بالاتر رفتن تنش آستانه رشد ترک کمک شایانی می‌کند و همچنین جوانه زنی ترک را به تاخیر می‌اندازد.



شکل ۳-۳۲: (a) وجود ناچ در گرده جوش یک نمونه بدون پینینگ، (b) بسته شدن ترک‌ها در گرده جوش با استفاده از UPT [۴۷]

استفاده از UPT سبب ارتقا عمر ماده در برابر بارهای متناوب می‌شود. در بارهای متناوب کاهش تمرکز تنش در ناحیه انتقالی گرده جوش و فلز پایه از اهمیت بسیار حیاتی برخوردار است. در جوش‌هایی که مقادیر زیادی از تنش پسماند در آن‌ها ایجاد می‌شود، استفاده از روش UPT می‌تواند عمر خستگی را تا ۵۰٪ یا بیشتر برای یک فولاد S355 J0 افزایش دهد. Statnikov و همکارانش [۴۸] یک تحقیق جامع در زمینه تأثیر عملیات‌های مختلف بر فولاد ساختمانی با استفاده از روش‌های ساچمه زنی، اصلاح با TIG^{۱۰} و UPT انجام داده است. در شکل ۳-۳۳ نتایج این تحقیق آورده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که در صورتی که روش UPT در شرایط مناسبی انجام پذیرد بالاترین بهبود در عمر خستگی را نتیجه می‌دهد. بهبود عمر خستگی با استفاده از روش‌های چکش زنی، اصلاح با TIG، ساچمه زنی و ترکیبی از اصلاح با TIG و UPT تا حدودی مشابه با هم و در حدود ۴۱-۵۱٪ در دو میلیون سیکل است. در مقایسه بهبود عمر خستگی با استفاده از روش UPT در حدود ۶۵-۷۵٪ می‌باشد.

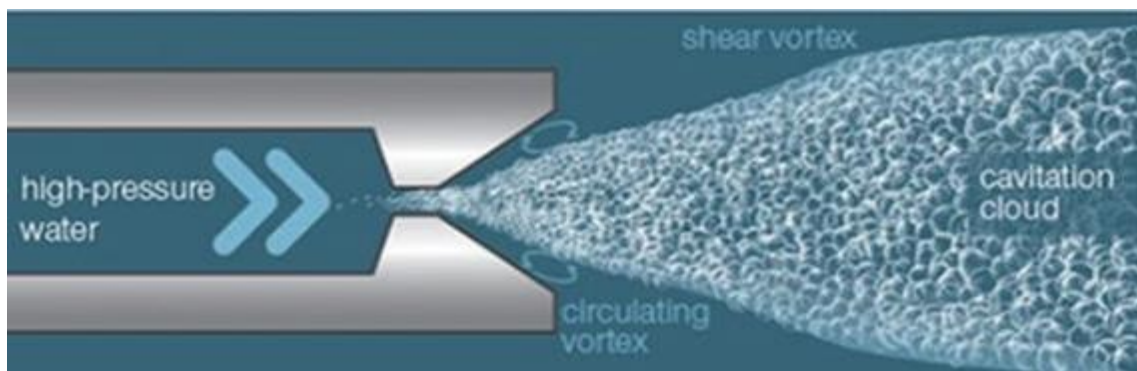
¹⁰ TIG dressing



شکل ۳-۳۳: تأثیر عملیات های مختلف بر بهبود عمر خستگی جوش فولاد Weldox 420 SSAB، (۱) جوش اولیه (۲) روش UPT با قطر بین ۵ mm، (۳) چکش زنی، (۴) ساچمه زنی، (۵) اصلاح با TIG، (۶) اصلاح با TIG و UPT، (۷) UPT با قطر بین ۳ mm [۴۸]

۱۰-۳- روش Cavitation Peening

روش Cavitation peening یا water jet peening یا ultrahigh-pressure water peening در فشار بسیار بالای 20,000 psi یا بالاتر کار می کند. جریان آب با فشار بسیار بالا با عبور از یک نازل کاویتاسیون بخار شده و حباب های کاویتاسیون ایجاد می کند. در شکل ۳-۳۴ طریقه ایجاد این حباب ها نمایش داده شده است.



شکل ۳-۳۴: طریقه ایجاد حباب در روش Cavitation peening [۴۹]

حباب های کاویتاسیون روی سطح جسم ترکیده و یک موج فشاری مشابه با موج فشاری روش لیزر پینینگ روی سطح ایجاد می شود. فشار شوک بیشتر از 145 ksi است. شوک فشار بالا تنش پسماند فشاری روی سطح را نتیجه می دهد. از آنجایی که جسم خارجی در این روش استفاده نمی شود، از این روش می توان برای گوشه ها، شکاف ها و هندسه های پیچیده استفاده کرد.

در شکل زیر نمایی از اعمال این روش روی یک قطعه نیروگاه هسته‌ای نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که این روش در نیروگاه‌های هسته‌ای جهت کاهش احتمال ایجاد ترک خوردگی تنش‌ی اولیه^{۱۱} بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۳۵: اعمال روش Cavitation peening روی جوش [۴۹]

در این روش برخلاف روش لیزر پینینگ هیچ حرارتی ایجاد نمی‌شود و در نتیجه هیچ کدام از خواص ماده تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. در شکل زیر تأثیر این روش بر گرده جوش نمایش داده شده است. در سطح جسم حفره‌هایی شکل می‌گیرد اما ابعاد این حفره‌ها کوچکتر از حفره‌های روش ساچمه زنی است.

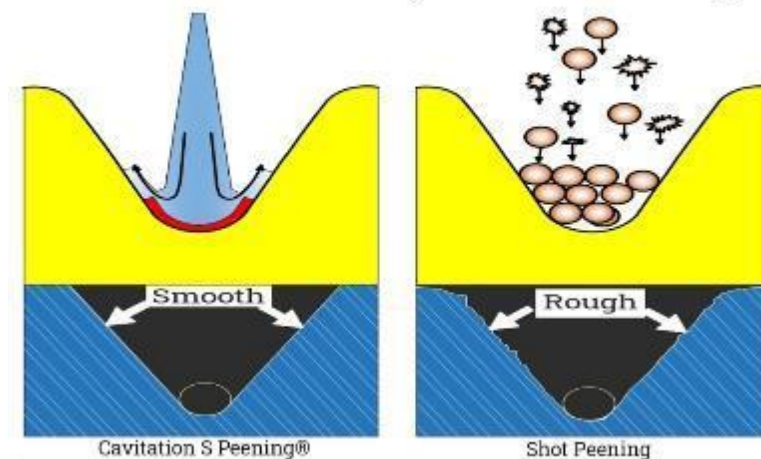


شکل ۳-۳۶: قبل و بعد از اعمال روش Cavitation peening [۴۹]

در شکل زیر دو روش ساچمه زنی و Cavitation peening با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

¹¹ primary water stress corrosion cracking

Cavitation S Peening® / Shot Peening



شکل ۳-۳۷: مقایسه روش ساچمه زنی و Cavitation peening

۱۱-۳- روش Rotary Flap Peening

در روش Rotary flap peening ساچمه‌های کاربردی به یک صفحه منعطف پلیمری متصل شدند. این صفحات از وسط داخل یک ماندل شده و با دوران ماندل ساچمه‌ها به سطح ضربه وارد می‌کنند. این روش برای ساچمه زنی سطح محدود و مشخص بسیار مفید می‌باشد. همچنین با این روش براحتی می‌توان داخل سوراخ‌ها را ساچمه زنی کرد.

Rotary Peening Flap



شکل ۳-۳۸: روش ساچمه زنی و Cavitation peening

۴- فصل چهارم: روش‌های آسایش تنش پسماند

۴-۱- مقدمه

در صورت حضور تنش پسماند کششی در یک سازه، عمر آن سازه به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به همین جهت لازم است که با استفاده از راهکارهای ارائه شده در این فصل، تنش پسماند را در سازه کاهش داد. برای این منظور دو دسته کلی تنش زدایی حرارتی و مکانیکی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر کدام مزایا و معایب خود را دارد. در این فصل سعی شده است که به صورت جامع و مختصر روش‌های تنش زدایی ارائه گردد. لازم به ذکر است از آنجائیکه بیشترین موارد استفاده از عملیات تنش زدایی برای کاهش تنش پسماند ناشی از جوشکاری است به همین جهت در این فصل به صورت ویژه تنش‌زدایی سازه‌های جوشکاری مورد توجه قرار گرفته است.

۴-۲- تنش زدایی حرارتی

عملیات حرارتی تنش‌زدایی^{۱۲} عبارت است از گرم کردن یکنواخت یک سازه تا دمای مناسب زیر حد بحرانی و سپس سرد کردن یکنواخت آن. معمولاً عملیات حرارتی در محدوده دمای بحرانی ناگوار می‌باشد و به همین علت تنش‌زدایی در بیشتر موارد زیر حد بحرانی انجام می‌گیرد.

تصمیم تنش‌زدایی یک جوش بر اساس مقررات استاندارد "دیگ‌های بخار و مخازن تحت فشار" که توسط انجمن مهندسان آمریکا تنظیم می‌شود اخذ می‌گردد. مقررات این استاندارد شرایط مواد، ترکیب شیمیایی، ضخامت و موارد لزوم تنش‌زدایی بعد از جوشکاری را تعریف می‌کند. دمای تنش‌زدایی برای فولادهای معمولی و کم آلیاژ که جوشکاری می‌شوند در محدوده $590^{\circ}\text{C} - 675^{\circ}\text{C}$ می‌باشد که پایین‌تر از حد بحرانی است.

مدت زمان تنش‌زدایی فولاد معمولاً برای هر اینچ ضخامت یک ساعت است، اگر چه مدت لازم برای دمای 590°C طولانی‌تر از زمان مورد نیاز برای 650°C است (زیرا دیرتر یک دما می‌شوند). قطعات پیچیده یا فولادهایی که میل زیادی به ترک خوردن دارند باید بلافاصله پس از جوشکاری و قبل از سرد شدن تا دمای پیش‌گرم، در کوره‌های تنش‌زدایی قرار بگیرند. اگر چه عملیات تنش‌زدایی فقط به‌خاطر از بین بردن تنش‌ها بکار می‌رود و تغییرات ساختاری فولاد از آن انتظار نمی‌رود ولی با این حال تأثیرات عمومی عملیات حرارتی تنش‌زدایی بصورت‌های زیر می‌باشد:

۱- بازیابی (Recovery)

۲- آرامش (Relaxation)

۳- تمپره کردن^{۱۳} (از بین بردن نواحی سخت)

اثر اول عمومی است، اثر دوم هنگامی ایجاد می‌شود که تنش‌زدایی در دمای بالا و به مدت کافی انجام بگیرد، اثر سوم فقط موقعی بدست می‌آید که در اثر جوشکاری نواحی سخت بوجود آمده باشند و دو اثر آخر در جوشکاری کم اهمیت هستند.

¹² Post Weld Heat Treatment (PWHT)

¹³ Tempering

سازه‌های جوش شده چه هنگام جوشکاری مهار شده و چه آزاد بوده باشند دارای تنش‌های باقیمانده در آستانه تنش تسلیم هستند، این تنش‌ها قادر می‌باشند اشکالاتی در جوش بوجود بیاورند. البته احتمال پدید آمدن این اشکالات به ترکیب شیمیایی فولاد، روش جوشکاری، طرح جوش و شرایط بهره برداری و غیره بستگی دارد. با این وصف از بین بردن این تنش‌ها فواید زیر را در پی خواهد داشت:

(۱) به حداقل رساندن احتمال گسترش خرابی، مخصوصاً در مواردی که چقرمگی بالایی مورد نیاز باشد

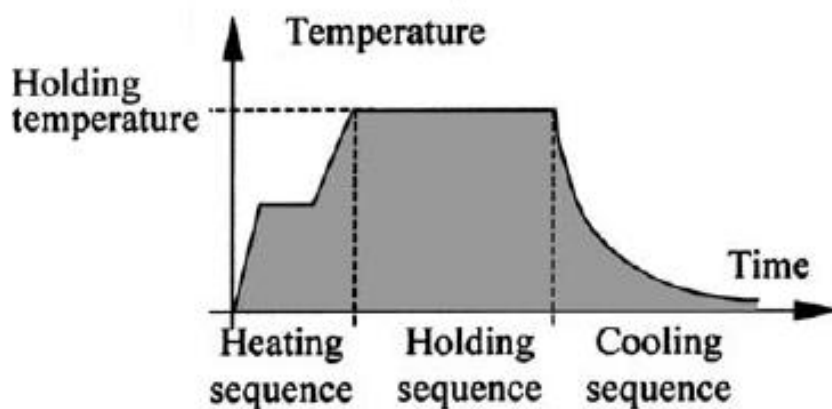
(۲) پایداری بیشتر ابعاد

(۳) مقاومت فراوان در مقابل خوردگی، مخصوصاً ترک خوردگی تنشی

بسیاری از فلزات و آلیاژها در معرض ترک خوردگی تنشی قرار دارند. فولاد از این امر مستثنی نمی‌باشد. تغییر ماهیت محیط خورنده یا کاهش تنش می‌تواند احتمال ترک خوردگی تنشی را از بین ببرد. اغلب تنش باقیمانده خیلی زیاد در نزدیکی جوش باعث افزایش شرایط ایجاد ترک می‌گردد و کاهش این تنش‌ها بوسیله عملیات حرارتی تنش‌زدایی برای از بین بردن احتمال ایجاد ترک کافی می‌باشد.

۱-۲-۴- سه گانه تنش‌زدایی حرارتی

تنش‌زدایی حرارتی از ۳ مرحله تشکیل شده است که شامل افزایش دما، توقف و سرد کردن می‌شود در شکل ۴-۱ این سه مرحله نمایش داده شده است.

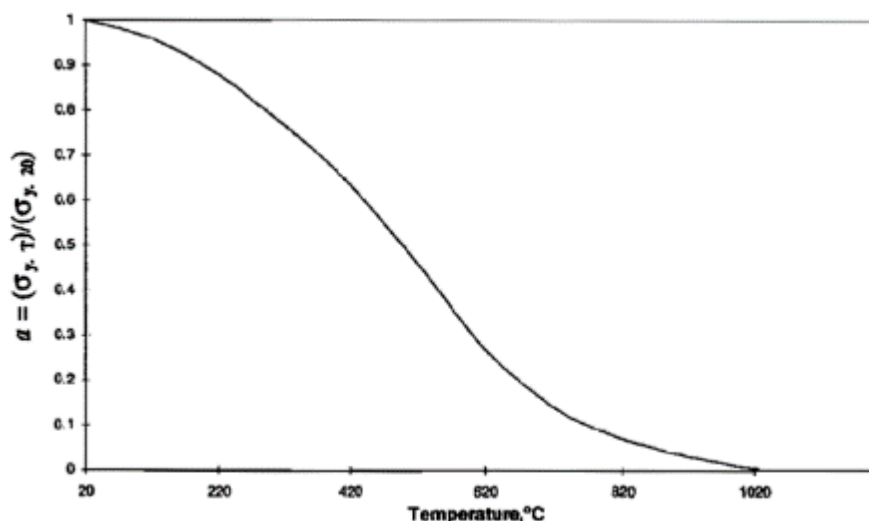


شکل ۴-۱: مراحل مختلف عملیات حرارتی [۵۰]

-افزایش دما

دما بطور یکنواخت و به آرامی افزایش داده می‌شود تا کلیه قسمت‌های سازه در تمام مدت تا حد امکان هم دما باشند و از ایجاد تنش‌های حرارتی جلوگیری گردد. با افزایش دما مقدار تنش تسلیم کاهش می‌یابد و این کاهش تنش تسلیم سبب کاهش سطح تنش‌های پسماند در جسم می‌گردد. این یک قانون کلی است که هنگام افزایش دمای یک ماده، تنش‌های داخلی آن

کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۴-۲ روند تغییرات تنش تسلیم با افزایش دما برای فولادهای کم کربن توسط آزمون کشش تک محوره آورده شده است.



شکل ۴-۲: تغییرات تنش تسلیم با دما [۵۱]

با توجه به استانداردهای موجود در این زمینه حداکثر نرخ افزایش دما برای فولادهای کم کربن در حدود 222°C/hr بر هر اینچ از ضخامت می‌باشد. لازم به ذکر است که برای این منظور می‌توان کل سازه را در کوره قرار داد و یا اینکه تنها بخشی از آن را تحت افزایش دما گذاشت. این دو حالت در شکل‌های ۴-۳ و ۴-۴ نمایش داده شده‌اند.

-توقف

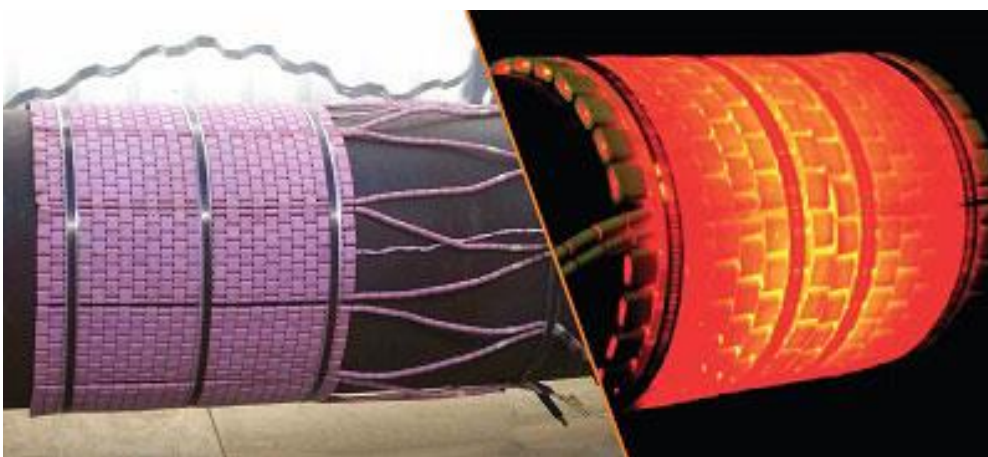
در این مرحله دمای کوره ثابت بوده و هیچ گونه افزایش دما اتفاق نمی‌افتد. دلیل این کار این است که تمامی قسمت‌های جسم به دمای ثابت مورد نظر برسند و تمامی جسم یک دما شود. زمان نگهداری در این مرحله معمولاً یک ساعت برای هر اینچ از ضخامت می‌باشد. البته بسته به هندسه و ماده مورد استفاده این زمان می‌تواند تغییر یابد.

-کاهش دما

در این مرحله و پس از یکنواخت شدن دما در سراسر قطعه، کوره خاموش شده و جسم در داخل کوره خنک می‌شود. در این مرحله نیز نرخ خنک کاری برای فولادهای کم کربن در حدود 222°C/hr بر هر اینچ از ضخامت باشد. البته می‌توان قطعه را هنگامی که به دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد رسید از کوره بیرون آورده و در هوا خنک کرد (برای افزایش تولید و کاهش زمان اجرای تنش‌زدایی اغلب این کار صورت می‌گیرد).



شکل ۴-۳: قرار دادن کل سازه داخل کوره جهت انجام تنش زدایی حرارتی



شکل ۴-۴: انجام عملیات حرارتی تنش زدایی روی بخشی از یک سازه

۴-۳- الزامات پیشگرم و دمای بین پاسی در جوشکاری

۴-۳-۱- مقدمه

به حرارت دهی فلز پایه به منظور رساندن آن به درجه حرارت مشخصی قبل از اعمال منبع حرارت جوشکاری (قوس الکتریکی، جریان الکتریکی شعله شیمیایی، پرتو لیزری و ...)، پیش گرم (Pre-heat) گفته می‌شود که به دو صورت کلی یا موضعی صورت می‌گیرد. هدف اصلی از اعمال پیشگرم، کاهش نرخ سرد شدن (Cooling Rate) فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت (HAZ) است که اثرات ذیل را در پی خواهد داشت:

الف) ایجاد ساختاری با خواص مکانیکی (استحکام، انعطاف‌پذیری و چقرمگی) مطلوب

ب) تقلیل سطح تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری در اتصال

ج) ایجاد سهولت جهت خروج هیدروژن

جوشکاری لوله ضخیمی را تصور نمایید، هنگامی که جوشکاری به پاس‌های فوقانی می‌رسد، ممکن است پاس ریشه یا مناطق دیگری از جوش خنک شوند. در این صورت امکان رخداد ترک وجود خواهد داشت. لذا به منظور اجتناب از این امر، پیشگرم انجام می‌شود. پیشگرم سرعت سرد شدن را تا حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده و از احتمال رخداد ترک می‌کاهد. همچنین چنانچه نرخ سرد شدن کاهش یابد هیدروژنی که به روش‌های مختلف وارد حوضچه جوش شده است، فرصت خروج پیدا می‌کند. همچنین برخی مواد از سختی بالایی برخوردارند که موجب می‌شود جوشکاری آن‌ها با مشکل همراه باشد. در صورت جوشکاری این مواد بدون پیشگرم، امکان بروز ترک به شدت افزایش خواهد یافت. پیشگرم موجب کاهش سختی و بهبود قابلیت جوشکاری می‌شود.

جهت تعیین لزوم یا عدم لزوم اعمال پیش گرم باید مواردی همچون الزامات استاندارد، ضخامت، ترکیب شیمیایی و حساسیت به ترک‌خوردگی فلز پایه، قطر و نوع ماده پرکننده (Filler) و نیز دما و رطوبت محیط کاری مورد ملاحظه قرار گیرد. به عنوان نمونه هنگام جوشکاری در محیط سرد و یا مرطوب، در غیاب هر نوع الزام استاندارد دیگری، دمای پیش گرمی حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد توصیه می‌شود. همچنین فولادهای ساده کربنی به ویژه در ضخامت‌های بیش از یک اینچ حساس به رخداد ترک سرد هستند، لذا جوشکاری این گروه از فولادها به همراه پیش گرمی متناسب با میزان کربن معادل و ضخامت فلز پایه توصیه می‌گردد.

لازم به ذکر است که دمای پیش گرم مذکور در استانداردها بیانگر حداقل دمای قطعه کار پیش از اعمال منبع حرارت جوشکاری می‌باشد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که بسته به شرایط ممکن است دمای واقعی پیشگرم بالاتر از مقادیر مندرج در استاندارد در نظر گرفته شده و اعمال گردد. به عنوان مثال جهت جوشکاری اتصالاتی با سطح قیود بالا، بهتر است دمای پیشگرمی بالاتر از آن درجه حرارت مندرج در استاندارد مورد استفاده قرار گیرد. پیشگرم اغلب به شکل موضعی و با استفاده از شعله انجام می‌شود، اما روش‌های دیگری مانند استفاده از المنت‌های حرارتی، به ویژه در کارهایی که از حساسیت و یا ابعاد بالایی برخوردارند، مرسوم هستند.

۲-۳-۴- دمای بین پاسی در جوشکاری

دمای بین پاسی عبارت است از دمای قطعه در ناحیه جوشکاری درست قبل از اعمال پاس دوم و یا بین هر دو پاس متوالی. در عمل حداقل دمای بین پاسی اغلب برابر است با دمای پیشگرم قطعه، هر چند که طبق تعریف این مورد الزامی نمی‌باشد. اهمیت دمای بین پاسی از نظر تأثیر بر خواص مکانیکی و ریزساختار قطعه، اگر بیشتر از اهمیت دمای پیشگرم نباشد، از آن کمتر هم نیست. به عنوان مثال، استحکام تسلیم و استحکام نهایی فلز جوش تابعی از دمای بین پاسی می‌باشد. مقادیر بالای

دمای بین پاسی باعث کاهش استحکام فلز جوش می‌شود. علاوه بر این دماهای بین پاسی بالا اغلب باعث بهبود خواص ضربه و سفتی جوش می‌گردد.

هنگامی که دستیابی به خواص مکانیکی مشخصی در فلز جوش مد نظر باشد، کنترل حداکثر دمای بین پاسی اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. در صورتی که طراح حداقل استحکام را برای قطعه‌ای که ممکن است در اثر شرایط جوشکاری به دماهای بین پاسی بالایی برسد، مشخص کرده باشد، باید حداکثر دمای بین پاسی نیز تعیین گردد. در غیر این صورت ممکن است استحکام جوش به شدت کاهش یابد.

در مورد فلزات حساس، حداقل دمای بین پاسی باید به حدی کافی باشد که از ایجاد ترک جلوگیری نماید، در حالی که حداکثر دمای بین پاسی نیز جهت دستیابی به خواص مکانیکی مناسب باید کنترل شود. برای رسیدن به یک تعادل بین این دو، پارامترهای زیر نیز باید مد نظر قرار گیرد: زمان بین اعمال پاس‌ها، ضخامت فلز پایه، دمای پیشگرم، شرایط محیطی، خصوصیات انتقال حرارت و حرارت ورودی حین جوشکاری. برای مثال جوش‌هایی با سطح مقطع کوچک‌تر طبیعتاً دمای بین پاسی را افزایش می‌دهند. بدین صورت که با ادامه عملیات جوشکاری دمای قطعه به دلیل انتقال حرارت کمتر، به طور مداوم افزایش می‌یابد.

محل اندازه‌گیری دمای بین پاسی در استانداردها مشخص شده است. به عنوان مثال در AWS D 1.5 و AWS D1.1 چنین آمده است که دمای بین پاسی باید در فاصله‌ای حداقل برابر با ضخامت قطعه ضخیم‌تر (اما نه کمتر از ۳ اینچ یا ۷۵ میلی‌متر) در تمامی جهات از نقطه جوشکاری، اندازه‌گیری شود. این حالت برای اندازه‌گیری حداقل دمای بین پاسی قابل درک است. اما وقتی کنترل حداکثر دمای بین پاسی نیز ضروری باشد، دمای ناحیه مجاور جوش ممکن است بسیار بالاتر از حد مشخص شده باشد. در این حالت بهتر است دما در فاصله یک اینچی از کناره گرده جوش^{۱۴} اندازه‌گیری شود.

۴-۴- عملیات حرارتی پس از جوشکاری

۴-۴-۱- مقدمه

در عملیات حرارتی پس از جوشکاری، اتصال / سازه جوشکاری شده اغلب در کوره‌هایی با محدوده حرارت پایین (به طوری که موجب تغییر فاز نشود)، حرارت دهی شده و پس از مدتی نگهداری، اجازه داده می‌شود تا به آرامی خنک شود. اغلب در این فرایند حرارت دادن و خنک کردن با روشی خودکار و کنترل شده با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری دقیق دما مانند ترموکوپل انجام می‌شود. انجام صحیح عملیات حرارت پس از جوشکاری وابسته به انتخاب و کنترل مناسب چهار پارامتر نرخ گرمایش، دمای نگه داشت، زمان نگهداری و نرخ سرمایش است.

الف) نرخ گرمایش

¹⁴ Weld Toe

سازه جوشکاری شده می‌بایست با میزان مشخصی از حرارت گرمادهی شوند، زیرا اگر میزان گرما مورد توجه قرار نگیرد، سازه مربوطه به دلیل توزیع حرارتی نامناسب در معرض تشدید تنش قرار می‌گیرد. لذا به منظور اجتناب از رخداد تنش و ترک‌خوردگی احتمالی حاصل از آن، توصیه می‌شود که مجموعه‌های جوشکاری شده با نرخ محدودی گرم شوند. این نرخ در استانداردها بیان شده است.

ب) دمای نگه داشت

بازه دمایی مشخصی برای نگه داشت سازه جوشکاری شده وجود دارد، تا از سطح تنش‌ها بطور موثری کاسته شود. دمای نگه داشت با توجه به جنس اجزای اتصال تعیین می‌گردد.

ج) زمان نگهداری

بازه زمانی مشخصی وجود دارد که به اتصال جوشی اجازه داده می‌شود تا در محدوده دمای نگه داشت باقی بمانند. این امر موجب می‌شود تا گرما به صورت یکسان در سراسر ضخامت توزیع گردد. زمان مناسب نگه داشت برای کاهش سطح تنش پسماند الزامی است و با توجه به ضخامت اتصالات تعیین می‌گردد.

د) نرخ سرمایش

نرخ سرمایش نیز می‌بایست به دقت مورد توجه قرار گیرد تا از ایجاد تنش و ترک‌خوردگی حاصل از آن به دلیل توزیع نامناسب حرارت پرهیز گردد. با اتمام زمان نگهداری، اتصال جوشکاری شده در کوره‌ای با نرخ سرمایش مشخص خنک می‌گردد.

عملیات حرارتی پس از جوشکاری اغلب با هدف آزاد کردن تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری، کاهش میزان سختی و عیوب حاصل از آن و پایداری ابعادی انجام می‌پذیرد. در انتخاب پارامترهای مورد نیاز جهت انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری، توجه فراوانی مورد نیاز است، زیرا تنظیم غلط آن‌ها می‌تواند به تغییر فاز، افزایش سختی یا کاهش استحکام منجر شود. در ادامه مزایای اصلی عملیات حرارتی پس از جوشکاری که آن را به فرایندی منحصر به فرد در صنعت جوشکاری تبدیل نموده است، پرداخته می‌شود.

۱) نرم کردن

جوشکاری در بسیاری از موارد می‌تواند به ازدیاد میزان سختی در فلز جوش و یا منطقه متأثر از حرارت (HAZ) منجر شود. عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT) روشی پرکاربرد جهت نرم کردن این مناطق بوده و توسط صنایع گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲) تنش‌زدایی

چرخه دمایی (Thermal Cycle) حاصل از فرایند جوشکاری موجب انبساط و انقباض در مناطق مختلف اتصال شده که این امر به پیدایش تنش‌های پسماند ناخواسته منجر می‌شود. عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT) یکی از روش‌های کاهش سطح تنش‌های پسماند است. در این روش ماده تا ذیل خط پایینی دمای بحرانی (Lower Critical Temperature Line)، جایی که تغییر فاز رخ نمی‌دهد، به شکل یکنواخت حرارت داده شده و سپس به

آرامی و در کوره خنک می‌شود. درجه حرارت بخش‌های مختلف مجموعه، اغلب توسط ترموکوپل‌هایی اندازه‌گیری شده و با تجمیع گزارشات مربوطه در اتاق کنترل، امکان پایش فرایند و در صورت لزوم اصلاح آن فراهم می‌شود. لازم به ذکر است که عملیات حرارتی پس از جوشکاری برای برخی از مواد از جمله فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA) توصیه نمی‌شود که دلیل آن تأثیر مخرب این چرخه حرارتی بر خواص منطقه HAZ است. برای این دست مواد و در برخی موارد، می‌توان از عملیات مکانیکی به عنوان جایگزین استفاده نمود.

۳) ممانعت از شکست ترد

وظیفه اصلی عملیات حرارتی پس از جوشکاری بهبود خواص مکانیکی مجموعه جوشکاری شده و مناسب نمودن آن برای شرایط خدماتی مورد نظر است. همان‌طوری که قبلاً گفته شد، عملیات حرارتی پس از جوشکاری باعث کاهش سطح تنش‌های پسماند، سختی ماده و فراهم آوردن انعطاف‌پذیری (Ductility) مورد نیاز در مجموعه جوشکاری شده می‌گردد، که این امر بهبود استحکام، مقاومت به شکست ترد و افزایش طول عمر (Lifespan) ماده برای شرایط کاری مورد نظر را به دنبال دارد.

۴) ممانعت از ترک‌خوردگی ناشی از تنش (SCC)

۵) سهولت ماشین‌کاری

۴-۴-۲- عملیات حرارتی پس از جوشکاری طبق استاندارد ASME B31.3

در استاندارد ASME B31.3 [۵۲] با توجه به P-Num و Group-Num، شرایط عملیات حرارتی بعد از جوشکاری برای مواد مختلف داده شده است (جدول 331.1.1) در جدول زیر، دمای PWHT و زمان نگهداری برای مواد مختلف بر حسب P-Num و Group-Num داده شده است.

جدول ۴-۱: دمای و زمان نگهداری طبق استاندارد ASME B31.3، جدول 331.1.1 [۵۲]

P-No. and Group No. (BPV Code Section IX, QW/QB-420)	Holding Temperature Range, °C (°F) [Note (1)]	Minimum Holding Time at Temperature for Control Thickness [Note (2)]	
		Up to 50 mm (2 in.)	Over 50 mm (2 in.)
P-No. 1, Group Nos. 1-3	595 to 650 (1,100 to 1,200)	1 h/25 mm (1 hr/in.);	2 hr plus 15 min for each
P-No. 3, Group Nos. 1 and 2	595 to 650 (1,100 to 1,200)	15 min min.	additional 25 mm (in.)
P-No. 4, Group Nos. 1 and 2	650 to 705 (1,200 to 1,300)		over 50 mm (2 in.)
P-No. 5A, Group No. 1	675 to 760 (1,250 to 1,400)		
P-No. 5B, Group No. 1	675 to 760 (1,250 to 1,400)		
P-No. 6, Group Nos. 1-3	760 to 800 (1,400 to 1,475)		
P-No. 7, Group Nos. 1 and 2 [Note (3)]	730 to 775 (1,350 to 1,425)		
P-No. 8, Group Nos. 1-4	PWHT not required unless required by WPS		

در دمای بالاتر از 315°C ، نرخ گرم کردن و سرد کردن نباید بیشتر از 335°C/h تقسیم بر نصف ضخامت مواد (بر حسب اینچ) باشد. اما در هیچ حالتی نباید بیشتر از 335°C/h گردد. در صورتی که اجزای اتصال یکسان نباشند باید دمای PWHT بالاتر را برای اتصال در نظر گرفت.

برای مواد با P-Num ۱ و ۳ می‌توان عملیات حرارتی را در دامنه وسیعتری از دماهای داده شده در جدول ۴-۲ انجام داد. در استاندارد ASME B31.3 استثنائاتی برای عملیات حرارتی مواد مختلف (بر حسب P-Num و Group-Num) قائل شده است که در ادامه و در جدول ۴-۳ تنها برای P-Num=1 استثنائات ذکر شده است (با توجه به گستردگی جدول، جدول منقطع شده و برای مابقی مواد، می‌توان به جدول B331.1.3 رجوع کرد).

جدول ۴-۲: الزامات روش جایگزین PWHT برای فولادهای کربنی و کم آلیاژ، P-Num=1,3 [۵۲]

Decrease in Specified Minimum Temperature, °C (°F)	Minimum Holding Time at Decreased Temperature, h [Note (1)]
30 (50)	2
55 (100)	4
85 (150) [Note (2)]	10
110 (200) [Note (2)]	20

NOTES:

- (1) Times shown apply to thicknesses ≤ 25 mm (1 in.). Add 15 min/25 mm (15 min/in.) of thickness for control thicknesses >25 mm (1 in.) (see para. 331.1.3).
- (2) A decrease $>55^{\circ}\text{C}$ (100°F) below the minimum specified temperature is allowable only for P-No. 1, Group Nos. 1 and 2 materials.

جوش‌ها را می‌توان به صورت محلی نیز PWHT کرد. برای این منظور در یک محدوده‌ای به مرکزیت خط جوش، عملیات PWHT انجام می‌شود. عرض این محدوده (باند)، باید حداقل سه برابر ضخامت دیواره در محل جوش باشد. این روش نباید برای عملیات حرارتی آستنیت‌ه کردن استفاده شود.

۴-۴-۳- عملیات حرارتی پس از جوشکاری طبق استاندارد ASME BPVC Section VIII, Division 1

استاندارد ASME BPVC Section VIII [۵۳] از مجموعه استانداردهای بویلر و مخازن تحت فشار است که به قواعد ساخت مخازن تحت فشار می‌پردازد. با توجه به گستردگی فلزات به کار رفته در ساخت مخازن، این استاندارد طیف وسیعی از فلزات را پوشش می‌دهد. این استاندارد یکی از مراجع اصلی در زمینه عملیات حرارتی پس از جوشکاری است که در ادامه مباحث ذکر شده در رابطه با PWHT در این استاندارد آورده شده است.

طبق این استاندارد در صورتی که ضخامت اتصالات جوشی برای فولادهای کربنی (مواد با P-Num=1) بیشتر از ۱۶ mm باشد، و همچنین برای تمام فولادهای کم آلیاژ فارغ از ضخامت جوش‌ها، عملیات حرارتی پس از جوشکاری اجباری می‌باشد. به عنوان حداقل شرایط، محدوده‌ای که باید عملیات حرارتی شود، شامل جوش، ناحیه HAZ و بخشی از ماده زمینه در

نزدیکی جوش است. کمینه محدوده انجام عملیات حرارتی، عریض ترین بخش جوش بعلاوه ضخامت جوش یا ۵۰ mm است (هر کدام که کمتر است) که باید در هر طرف جوش و در ابتدا و انتهای جوش اعمال گردد. در صورتی که دو قطعه با P-Num های مختلف به یکدیگر جوش داده باشند، دمای عملیات حرارتی پس از جوشکاری باید بر اساس دمای بالاتر انجام پذیرد.

در بخش UCS-56 استاندارد مذکور، الزامات انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری آورده شده است که بخشی از نکات مهم در ادامه آمده است:

- ۱) در لحظه‌ای که قرار است قطعات داخل کوره قرار بگیرند، دمای کوره نباید بیشتر از 425°C باشد.
- ۲) در دمای بالاتر از 425°C ، نرخ گرم کردن نباید بیشتر از 222°C/h بخش بر ماکزیمم ضخامت فلز بر حسب اینچ باشد. اما در هیچ حالتی نباید نرخ گرم کردن بیشتر از 222°C/h باشد. در طول بازه افزایش دما در کوره، تغییرات دما در هر ۴۶ m از سازه، نباید بیشتر از 140°C باشد.
- ۳) در بازه زمانی نگهداری، حداکثر اختلاف دما نباید بیشتر از 83°C باشد.
- ۴) در طول بازه گرم کردن و نگهداری، اتمسفر کوره باید چک شود تا از اکسیدشدن سطوح (مخزن) جلوگیری کرد. کوره باید به گونه‌ای باشد که شعله به طور مستقیم در تماس با قطعه نباشد.
- ۵) بالای دمای 425°C ، خنک کاری باید در کوره بسته قرار گیرد و نرخ سرد کردن نباید بیشتر از 280°C/h بخش بر ماکزیمم ضخامت فلز بر حسب اینچ باشد. اما در هیچ حالتی نباید نرخ سرد کردن بیشتر از 280°C/h باشد. در دمای کمتر از 425°C ، اجزا می‌توانند در هوا خنک شوند.

در جداول UCS-56-1 الی UCS-56-11 برای P-Num های مختلف، شرایط انجام PWHT شرح داده شده است. به عنوان یک نمونه، در جدول زیر، برای $P\text{-Num}=1$ حداقل دما و زمان نگهداری برای ضخامت‌های متفاوت داده شده است. بر این اساس قطعه جوش داده شده باید تا دمای 595°C گرم شود و سپس بسته به ضخامت قطعه، برای بازه زمانی مشخصی در این دما باقی بماند.

جدول ۴-۳: شرایط PWHT طبق استاندارد ASME BPVC برای فولادهای $P\text{-Num}=1$

Material	Normal Holding Temperature, °F (°C), Minimum	Minimum Holding Time at Normal Temperature for Nominal Thickness [See UW-40(f)]		
		Up to 2 in. (50 mm)	Over 2 in. to 5 in. (50 mm to 125 mm)	Over 5 in. (125 mm)
P-No. 1 Gr. Nos. 1, 2, 3	1,100 (595)	1 hr/in. (25 mm), 15 min minimum	2 hr plus 15 min for each additional inch (25 mm) over 2 in. (50 mm)	2 hr plus 15 min for each additional inch (25 mm) over 2 in. (50 mm)
Gr. No. 4	NA	None	None	None

در این استاندارد برای فولادهای کربنی و کم آلیاژ، روش جایگزینی ارائه شده است. طبق این روش می‌توان دمای کوره را کاهش داد اما بایستی زمان نگهداری را افزایش داد. اعداد داده شده در این جدول برای ضخامت ۲۵ mm بوده و به ازای افزایش هر ۲۵ mm در ضخامت اجزا، باید حداقل زمان نگهداری ۱۵ دقیقه افزایش یابد.

جدول ۴-۴: روش جایگزین برای PWHT فولادهای کربنی و کم آلیاژ

Table UCS-56.1 Alternative Postweld Heat Treatment Requirements for Carbon and Low Alloy Steels		
Decrease in Temperature Below Minimum Specified Temperature, °F (°C)	Minimum Holding Time [Note (1)] at Decreased Temperature, hr	Notes
50 (28)	2	...
100 (56)	4	...
150 (83)	10	(2)
200 (111)	20	(2)

GENERAL NOTE: Applicable only when permitted in
Tables UCS-56-1 through UCS-56-11.

NOTES:

(1) Minimum holding time for 1 in. (25 mm) thickness
or less. Add 15 minutes per inch (25 mm) of thick-
ness for thicknesses greater than 1 in. (25 mm).

(2) These lower postweld heat treatment tempera-
tures permitted only for P-No. 1 Gr. Nos. 1 and 2
materials.

۴-۴-۴- الزامات PWHT در استاندارد AWS D1.1

در بخش ۳.۱۴ استاندارد AWS D1.1 [۵۴] الزامات زیر ذکر شده است:

- (۱) حداقل تنش تسلیم ماده زمینه نباید کمتر از ۳۴۵ MPa باشد
- (۲) ماده زمینه نباید کوئنچ و تمپر یا کوئنچ و self-tempering شده باشد. همچنین نباید به وسیله $TMCP^{15}$ ساخته شده باشد یا با انجام کار سرد مقاومت مکانیکی آن افزایش یافته باشد.
- (۳) نایبستی الزاماتی برای آزمون notch toughness برای ماده زمینه، جوش یا HAZ در نظر گرفته شده باشد.
- (۴) باید داده‌های کافی در اختیار باشد که فلز جوش مقاومت و نرمی کافی در شرایط PWHT را دارد (فیلر استفاده شده باید طبق استاندارد AWS A5.X قابل استفاده در PWHT باشد).

همچنین در بخش ۵.۸ استاندارد ذکر شده است که فرایند تنش‌زدایی بایستی با الزامات شرح داده شده در زیر انجام پذیرد

- (۱) در لحظه‌ای که قرار است قطعات داخل کوره قرار بگیرند، دمای کوره نباید بیشتر از 315°C باشد.
- (۲) در دمای بالاتر از 315°C ، نرخ گرم کردن نباید بیشتر از 220°C/h بخش بر ماکزیمم ضخامت فلز بر حسب اینچ باشد. اما در هیچ حالتی نباید نرخ گرم کردن بیشتر از 220°C/h باشد. در طول بازه افزایش دما در کوره، تغییرات

¹⁵ thermos-mechanical controlled processing

دما در هر ۵ m از سازه، نباید بیشتر از 140°C باشد. نیازی نیست که نرخ گرم کردن و سرد کردن کمتر از 55°C بر ساعت باشد.

(۳) بیشینه دمای گرم کردن برای فولادهای کوئچ و تمپر شده بایستی حداقل 600°C و برای مابقی فولادها، 600°C الی 650°C باشد. زمان نگهداری باید منطبق بر مقادیر داده شده در جدول ۵.۲ استاندارد باشد. در بازه زمانی نگهداری، حداکثر اختلاف دما نباید بیشتر از 65°C شود.

(۴) در دمای بالاتر از 315°C ، نرخ سرد کردن نباید بیشتر از 260°C/h بخش بر ماکزیمم ضخامت فلز بر حسب اینچ باشد. اما در هیچ حالتی نباید نرخ گرم کردن بیشتر از 260°C/h باشد. از دمای 315°C ، مجموعه می‌تواند در هوا خنک شود.

جدول ۴-۵: حداقل زمان نگهداری در فرایند PWHT طبق استاندارد AWS D1.1 [۵۴]

Table 5.2 Minimum Holding Time (see 5.8.1)		
1/4 in [6 mm] or Less	Over 1/4 in [6 mm] Through 2 in [50 mm]	Over 2 in [50 mm]
15 min.	15 min. for each 1/4 in [6 mm] or fraction thereof	2 hrs plus 15 min. for each additional in [25 mm] or fraction thereof over 2 in [50 mm]

لازم به ذکر است، در صورتی که هدف از عملیات حرارتی بعد از جوش، کاهش تنش‌های پسماند باشد، منظور از ضخامت در جدول بالا، ضخامت جوش است. اما در صورتی که هدف از انجام عملیات حرارتی، حفظ پایداری ابعادی سازه در ماشین‌کاری‌های بعدی باشد، منظور از ضخامت، بیشترین ضخامت اجزا می‌باشد (بخش C-5.8 استاندارد مذکور).

۴-۵- روش تنش زدایی ارتعاشی

۴-۵-۱- مقدمه

در سازه‌هایی که در آن‌ها تنش پسماند وجود دارد می‌توان با اعمال یک تنش خارجی به گونه‌ای که جمع تنش پسماند و تنش خارجی بالاتر از تنش تسلیم ماده شود در ماده کرنش پلاستیک ایجاد کرد و در نتیجه سبب کاهش تنش پسماند شد. تنش-زدایی ارتعاشی^{۱۶} از این اصل استفاده می‌کند به گونه‌ای که با اعمال تنش نوسانی به تنش پسماند در داخل جسم سبب ایجاد کرنش پلاستیک می‌شود.

¹⁶ Vibratory Stress Relief (VSR)

سازه‌های واقعی دارای توزیع تنش بسیار پیچیده‌ای هستند و اعمال بارهایی که به اندازه کافی بزرگ باشند تا تنش‌زدایی مؤثر باشد، مشکل و عملاً غیر ممکن است. این بارها می‌بایست در موقعیت‌های مناسب و با دقت به سازه وارد شوند تا اثر مطلوبی ارائه دهند. به دلیل آن که جابجایی و کرنش‌های بزرگ یک سازه در حالت رزونانس قابل دستیابی است، در این حالت به مقادیر کمی نیرو برای تحریک سازه نیاز است. ارتعاش کنترل شده سازه راه حل بسیار مناسبی برای بارگذاری یک سازه با یک فرم کاملاً پیچیده است.

توجه به نکات ذیل در تنش‌زدایی ارتعاشی ضروری است:

۱. اگر هدف اولیه، تنها کنترل پایداری ابعادی قطعه باشد نیاز نیست تا تمام تنش‌های پسماند از میان بروند.
۲. شکل مدهای ارتعاشی سازه باید تعیین شوند و برای بدست آوردن توزیع یکنواخت کرنش، مدهای بالاتر باید تحریک شوند.
۳. جمع جبری مقدار تنش خارجی و تنش پسماند باید از تنش تسلیم بالاتر رود.

کاربرد این روش شامل دو مقوله عمده می‌باشد که عبارتند از :

۱. تنش گیری و تابگیری قطعات ریخته شده یا جوشکاری شده
 ۲. جلوگیری از ایجاد تنش پسماند حین جوشکاری
- هر دو مورد از یک قانون و اصل کلی تبعیت می‌کنند و مورد اول جایگزین عملیات حرارتی تنش‌زدایی است و مورد دوم به جای پیشگرم استفاده می‌شود.

به علاوه کاربرد اصلی و اختصاصی این روش در موارد زیر است :

- فولادهای زنگ نزن آستنیتی: فولادهای زنگ نزن که در آن‌ها وجود کاربید کروم باعث می‌شود در عملیات تنش-زدایی حرارتی مقاومت ماده به خوردگی به دلیل درجه حرارت بالا از میان برود.
- مواد با خواص نامتقارن (Dissimilar): اعوجاج ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی مهم‌ترین مشکل این گونه مواد در عملیات تنش‌زدایی حرارتی است.
- آلیاژهای پیر سخت شده: آلیاژهایی که مقاومت‌شان با حرارت از میان می‌رود نیز می‌بایست از طریق مکانیکی تنش-زدایی شوند.

در این قسمت فهرستی از مهم‌ترین مزایای تنش‌زدایی ارتعاشی ارائه می‌گردد.

• کاهش هزینه‌ها تا میزان ۹۵٪

در واقع حذف کوره و مصرف توان‌های بسیار پایین در حد چند صد وات باعث کاهش هزینه‌ها تا این حد می‌گردد. البته میزان کاهش بسته به نوع، اندازه و جرم قطعه متفاوت است اما به هر حال این مقدار قابل توجه است.

- کاهش زمان مورد نیاز تا ۹۸٪

معمولاً اگر قطعات چندان پیچیده و بزرگ نباشند کل عملیات تنش گیری با استفاده از این روش در حد چند دقیقه وقت می گیرد. ولی به هر حال نسبت به روش حرارتی بسیاری از زمان ها مثل آماده سازی کوره، زمان مورد نیاز برای گرم کردن و سپس سرد کردن آن که به صورت تدریجی می باشد حذف می شود.

- راندمان بالا و عدم تولید آلودگی

با توجه به مسائل زیست محیطی که امروزه بسیار مورد توجه جوامع مختلف است کاهش قابل توجه آلودگی و استفاده از انرژی های پاک (برق) مهمترین مزیت این روش است

- نبود محدودیت در اندازه یا وزن قطعات

- قابل حمل بودن تجهیزات

نقطه مقابل روش تنش زدایی ارتعاشی روش تنش زدایی حرارتی است که بیشترین کاربرد در بین روش های تنش زدایی را دارد. این روش توسط کدهای استاندارد توصیه شده و برای فلزات مختلف دستورالعمل آن تدوین شده است. روش تنش زدایی حرارتی علاوه بر کاهش تنش های پسماند سبب اصلاح متالورژیکی مواد می گردد و به همین جهت کاربردهای دیگری غیر از تنش زدایی نیز دارد. برای نمونه سختی سطح افزایش می یابد و یا با کاهش ابعاد دانه ها مقاومت آن ها به خوردگی بهتر می شود. در این روش دمای قطعات را به صورت کنترل شده و با شیب ملایم و معین تا حد مشخصی بالا برده، مدت مشخصی در آن دما نگه داشته و مجدداً به صورت کنترل شده و با شیب ملایم و مشخص دمای آن را پایین می آورند. این روش با وجود قابلیت های قابل توجه در بهبود خواص مواد، معایب و محدودیت هایی نیز دارد. از جمله:

- هزینه بالای عملیات بخاطر انرژی لازم برای کوره (عمدتاً سوخت های فسیلی و در کوره های کوچکتر انرژی برق)

- محدودیت ابعاد کوره برای قطعات بزرگ و سنگین

- زمانبر بودن عملیات (تا چند روز)

- هزینه های حمل قطعات تا محل کوره و بازگشت به کارگاه جهت ادامه فرایند ساخت

- اکسید شدن سطح قطعات، از بین رفتن پوشش قطعات در مورد قطعات تعمیری

- نداشتن تأثیر مطلوب روی برخی از آلیاژها همچون فولاد زنگ نزن آستنیتی

- محدودیت اعمال روی برخی متریال ها همچون فولاد کم کربن استحکام بالا به دلیل تخریب خواص مکانیکی و یا

جوانه زنی ترک در قطعه

- احتمال بروز پیچش و تغییر شکل قطعات

- کاهش سختی سطحی قطعات

- احتمال بالای تخریب خواص مکانیکی روی قطعاتی که کوئنچ تمپر شده باشند

- احتمال بوجود آمدن تنش‌های پسماند اضافی در مرحله سردکردن، مخصوصاً در مورد قطعات نامتقارن که احتمال کاهش دمای غیریکنواخت و بوجود آمدن گرادیان دمایی در قطعه بالاست
- محدودیت در تنش زدایی قطعات ساخته شده از متریال‌های ناهمجنس (به دلیل اختلاف در ضریب انبساط حرارتی مواد مختلف)
- غیرممکن برای برخی مواد غیر فلزی همچون پلاستیک‌ها و سرامیک‌ها

سیستم تنش‌زدایی ارتعاشی از یک دستگاه مرکزی شامل کلیدهای کنترل‌کننده و صفحه نمایش و همچنین یک موتور نامیزان مرتبط با دستگاه مذکور تشکیل شده است. در تنش‌زدایی ارتعاشی تشخیص شکم و گره در جسم از اهمیت بسزایی برخوردار است. روش کار در تنش‌زدایی ارتعاشی بدین صورت می‌باشد که ابتدا جسم بر روی دمپرهایی سوار می‌شود. برای اینکه تکیه‌گاه در اثر نوسان جسم به آن نیرو وارد نکند و باعث ایجاد موج نوسانی دیگری در جسم نگردد از دمپر استفاده می‌شود و آن‌ها را در گره جسم می‌گذارند (تشخیص شکم و گره در اجسام پیچیده مشکل بوده و معمولاً توسط تجربه صورت می‌پذیرد). برای اینکه نیروی لازم برای نوسان جسم و رسیدن آن به فرکانس طبیعی به حداقل برسد موتور را در شکم، تحت نوسان قرار می‌دهند و آن را توسط بست‌هایی به جسم مقید می‌نمایند. دستگاه مرکزی به موتور مرتبط بوده و در کنار موتور قرار می‌گیرد. پس از بالانس جسم موتور را روشن کرده و بوسیله دستگاه مرکزی فرکانس طبیعی جسم را با تغییر دور موتور بدست می‌آورند. روش کار به این گونه است که فرکانس موتور را به آرامی افزایش می‌دهند و توسط یک کرنش‌سنج جابه‌جایی را مشاهده می‌کنند. هنگامی که جابجایی به یکباره شروع به افزایش می‌کند جسم دچار تشدید شده و فرکانس مربوطه فرکانس طبیعی اول جسم می‌باشد. با ادامه این روند می‌توان فرکانس‌های طبیعی دوم و بالاتر قطعه را نیز به دست آورد. سپس با تنظیم دستگاه مرکزی و موتور روی فرکانس طبیعی جسم آن را در این شرایط به مدت بیست دقیقه الی نیم ساعت نوسان می‌دهند. کرنش پلاستیک در جسم در سیکل‌های اولیه ایجاد می‌گردد. بازه زمانی انجام نوسان بمنظور اطمینان از ایجاد کرنش پلاستیک در سیکل‌های انجام شده می‌باشد. در صورتی که دستگاه مرکزی فرکانس طبیعی دوم را نیز به نمایش گذاشته باشد مراحل شرح داده شده برای فرکانس طبیعی اول برای فرکانس طبیعی دوم تکرار می‌گردد. بعضاً در نقاط مختلف موتور را قرار داده و تنش‌زدایی انجام می‌شود. دلیل این کار حصول اطمینان از تنش‌زدایی تمام نقاط در سازه‌های پیچیده است. برای تست انجام شدن تنش‌زدایی روش‌های مختلفی وجود دارد که نیازمند تکنولوژی و دستگاه‌های پیشرفته‌ای می‌باشد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش Hole Drilling اشاره کرد. در شکل ۴-۵ دستگاه نمایش دهنده، موتور و دمپرها (از ۳ دمپر استفاده شده) نشان داده شده است. وزن قطعه ۷۰۰۰ کیلوگرم است که در کمتر از چند ساعت تنش‌زدایی شده است.

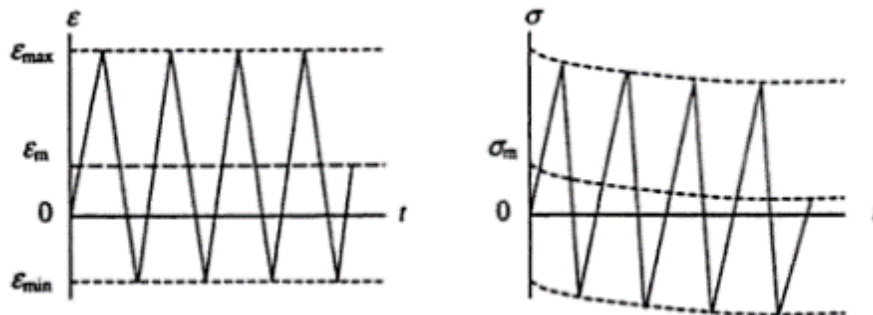


شکل ۴-۵: تجهیزات تنش‌زدایی ارتعاشی (شرکت VSR)

۲-۵-۴- اصول حاکم بر تنش‌زدایی ارتعاشی

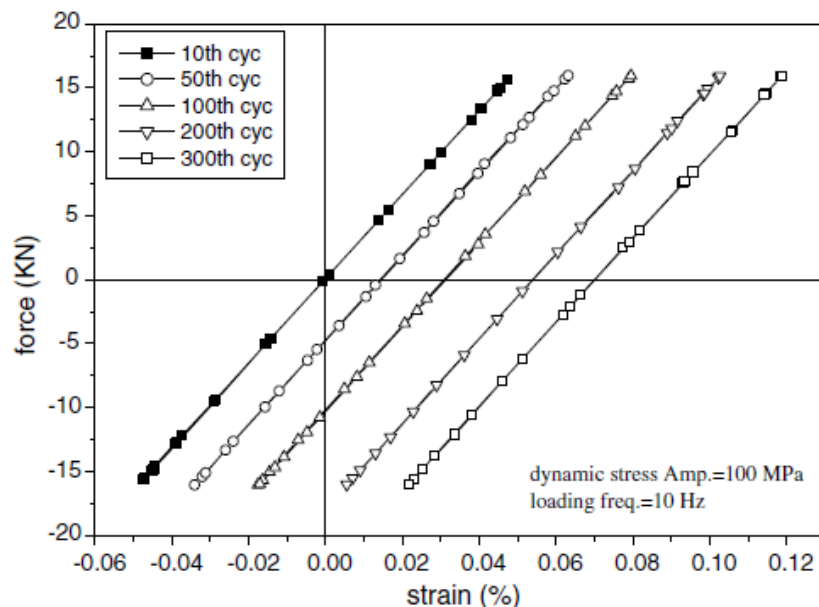
در صورتی که در آزمایش خستگی، جابه‌جایی ثابت فرض شود و در جسم نیز تنش متوسط وجود داشته باشد این تنش متوسط با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد (به سمت صفر می‌رود هم برای حالت فشاری و هم کششی) که به این فرایند آرامش تنش متوسط^{۱۷} می‌گویند. این آرامش تنش ناشی از تغییر شکل پلاستیک می‌باشد. این کاهش تنش متوسط در تعداد چرخه‌های کم اتفاق می‌افتد و پس از مدتی متوقف می‌شود (شکل ۴-۶). هر چه کرنش پلاستیک بیشتر شود این کاهش تنش نیز بیشتر می‌شود در نتیجه در دامنه کرنش پلاستیک بالاتر آزادسازی تنش بیشتر است. همان‌طور که از شکل ۴-۶ مشخص است تنش متوسط کششی سبب شده است تنش کششی ماکزیمم بیشتر از تنش فشاری ماکزیمم باشد. حال در صورتی که بار نوسانی به جسم وارد شود سبب می‌شود که جسم فقط از یک ناحیه وارد ناحیه پلاستیک شود. در نتیجه هنگامی که جسم وارد ناحیه پلاستیک می‌شود کرنش پلاستیک بوجود آمده و در اثر این کرنش پلاستیک تنش آزاد می‌شود. با توجه به اینکه در جهت مخالف این اتفاق رخ نمی‌دهد سبب می‌شود که آزادسازی تنش تنها در یک جهت رخ دهد و در نتیجه تنش متوسط به سمت صفر میل کند. همین روند برای زمانی که در جسم تنش فشاری متوسط وجود دارد نیز اتفاق می‌افتد با این تفاوت که در آن‌جا جسم فقط از ناحیه فشاری وارد ناحیه پلاستیک می‌شود.

¹⁷ mean stress relaxation



شکل ۴-۶: کاهش تنش متوسط تحت آزمایش کرنش ثابت با یک کرنش متوسط [۵۵]

همچنین در صورتی که در یک آزمایش خستگی تنش ثابت باشد و در جسم تنش متوسط (کرنش متوسط) وجود داشته باشد پدیده‌ای به نام خزش چرخه‌ای^{۱۸} اتفاق می‌افتد به گونه‌ای که با افزایش تعداد چرخه‌ها میزان کرنش خزشی افزایش پیدا می‌کند. البته در این جا نیز پس از مدتی به یک مقدار پایدار خواهیم رسید. در شکل ۴-۷ افزایش کرنش برای فولاد 304L نشان داده شده است.



شکل ۴-۷: افزایش کرنش با افزایش تعداد چرخه‌ها برای فولاد 304L [۵۶]

البته دو پدیده بالا در اکثر اوقات همزمان اتفاق می‌افتند. در اثر پدیده آرامش تنش، کرنش پلاستیک افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه کرنش الاستیک کاهش پیدا می‌کند (کرنش مجموع ثابت است) که این امر سبب کاهش تنش الاستیک (متوسط) می‌شود. در حالت دوم نیز به دلیل افزایش کرنش پلاستیک تنش متوسط آزاد می‌شود. البته لازم به ذکر است که هر چه میزان تنش اعمالی و یا کرنش اعمالی بیشتر باشد آزادسازی تنش بیشتر است.

¹⁸ cyclic creep

در آزادسازی ارتعاشی تنش نیز همین اتفاق می افتد با این تفاوت که در اینجا تنش پسماند همانند تنش متوسط عمل می کند و با توجه به بالا بودن تنش پسماند در جوش می توان با اعمال مقدار کمی تنش با دامنه زیاد (دامنه ارتعاش در فرکانس رزونانس) مقدار زیادی از تنش را آزاد کرد.

۴-۶- الزامات تنش زدایی ارتعاشی

برخی از مهمترین الزامات انجام تنش زدایی ارتعاشی به شرح زیر است:

شرایط ماده: ماده باید شکل پذیر باشند. قطعات ساخته شده با جوشکاری، ریخته گری، فورج یا نورد گرم را می توان تنش زدایی ارتعاشی کرد. موادی که تحت نورد سرد و یا سخت کاری کلی قرار می گیرند، در برابر تنش زدایی ارتعاشی مقاوم هستند.

هندسه سازه: قطعات بزرگ بهتر تنش زدایی ارتعاشی می شوند زیرا دامنه ارتعاش در این قطعات بزرگتر بوده و عموماً فرکانس طبیعی پایین تری دارند. البته لازم به ذکر است که قطعات با ابعاد حدوداً ۵۰۰ mm نیز به خوبی تنش زدایی ارتعاشی شده اند.

قرار دادن صحیح سازه روی دمپرهای مناسب: بالشتک های پلیمری (Load Cushion) از مواد نرم مانند urethane یا neoprene ساخته می شوند. این بالشتک ها باید دور از گوشه ها قرار بگیرند تا میرایی سازه مینیمم شود.

موقعیت و جهت مناسب نوسانگر: نوسانگر باید دور از گوشه ها نصب شود. همچنین محور دوران نوسانگر باید به صورتی باشد که سبب رزونانس در سازه شود. نوسانگر بهتر است که با یک گیره دوتایی، به سازه محکم بسته شود.

موقعیت و جهت مناسب سنسور شتاب سنج: بهترین موقعیت سنسور شتاب سنج، قرارگیری در یکی از گوشه های سازه و در صفحه ای عمود بر محور دوران نوسانگر است. نقطه ای که بیشترین جابجایی در آن اتفاق می افتد بهترین نقطه برای نصب شتاب سنج است.

تنظیم نامیزانی نوسانگر: نامیزانی نوسانگر باید به اندازه ای باشد که سبب رزونانس در سازه شود و حداقل چند g شتاب در شتاب سنج دیده شود.

تعیین پیک های رزونانس: یکی از کارهای بسیار حساس و مهم در تنش زدایی ارتعاشی یافتن پیک رزونانس است. در صورتی که سرعت اسکن بالا باشد، نمی توان پیک ها را شناسایی کرد زیرا پیک ها معمولاً بسیار باریک می باشند. به دلیل اینرسی بسیار بالای سازه، همیشه یک تاخیر زمانی در رزونانس سازه وجود دارد. لازم به ذکر است که با افزایش سایز یک قطعه، نیاز است که سرعت اسکن سازه جهت یافتن پیک های رزونانسی کاهش یابد.

اسکن بسیار سریع منجر به این می شود که پیک های رزونانس دیده نشوند و یا بخشی از آن ترسیم شود. برای نمونه در شکل ۴-۸، برای یک سازه در دو نرخ افزایش سرعت ۱۰ rpm و ۵۰ rpm داده های شتاب سنج ثبت شده است. با توجه به شکل کاملاً مشخص است که در صورت افزایش سرعت موتور با نرخ ۵۰ rpm، پیک چهارم اصلاً دیده نمی شود و پیک های اول تا سوم نیز ارتفاع نادرستی خواهند داشت.

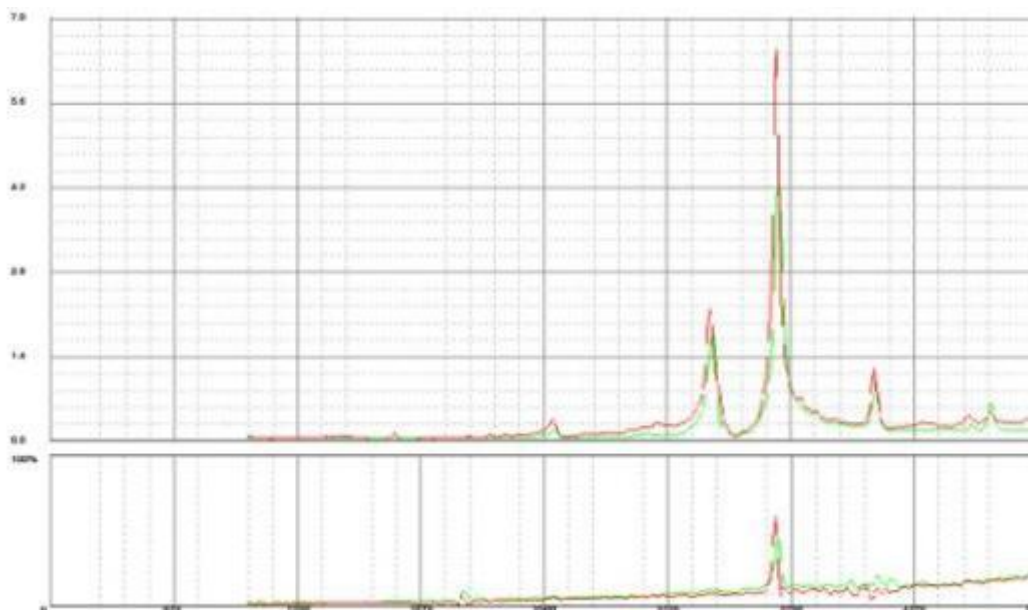


شکل ۴-۸: تأثیر سرعت اسکن بر تشخیص پیکهای رزونانس سازه

تأثیر تنش زدایی بر نمودار شتاب سازه-سرعت نوسانگر: در صورتی که نوسانگر در سرعت مناسب تنظیم شود و برای مدت زمان مناسبی، سازه تحت ارتعاش در فرکانس مذکور قرار گیرد، تنش‌های پسماند در سازه آزاد می‌شوند. آزاد سازی تنش پسماند معمولاً همراه با دو اتفاق زیر است:

- افزایش دامنه پیک‌ها
- شیفیت پیک‌ها به سمت سرعت‌های پایین‌تر

افزایش دامنه پیک‌ها کاملاً قابل توجه است اما شیفیت پیک‌ها به سمت فرکانس‌های پایین‌تر، اندک بوده و به لحاظ درصدی تغییرات کمی دارد. هر دو این تغییرات به سبب کاهش صلبیت سازه است. حضور تنش پسماند سبب افزایش صلبیت سازه می‌شود. در مثال زیر (شکل ۴-۹) که یک الگوی مرسوم از تنش زدایی ارتعاشی است، افزایش ارتفاع پیک ۴۷٪ و کاهش فرکانس تحریک ۰.۷۵٪ مشاهده می‌شود. در صورتی که زمان کافی برای تنش زدایی در نظر گرفته شود، نمودار شتاب بر حسب سرعت پایدار شده و تغییراتی نخواهد داشت.

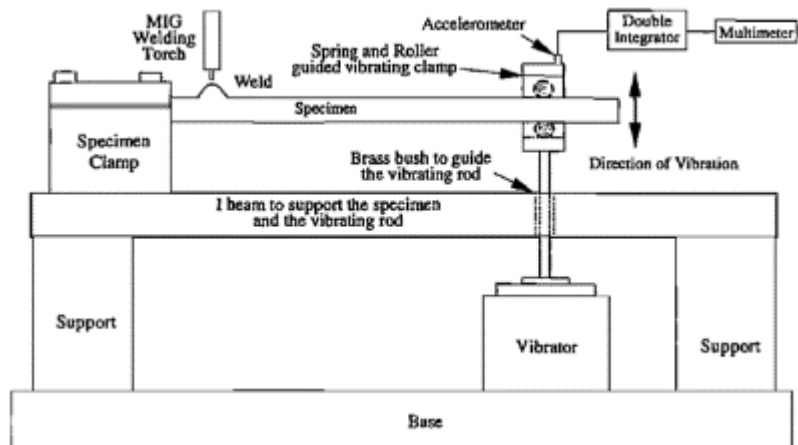


شکل ۴-۹: تأثیر تنش زدایی ارتعاشی بر نمودار شتاب (دامنه) بر حسب سرعت نوسانگر

نمودار توان موتور برای تعیین موقعیت و جهت نوسانگر و برای تعیین نامیزانی نوسانگر مفید است. در صورتی که موقعیت یا جهت نوسانگر صحیح نباشد و یا نامیزانی زیادی در نظر گرفته شده باشد، پیک‌های بزرگی در نمودار توان موتور مشاهده خواهد شد.

۴-۷- تحقیقات تجربی

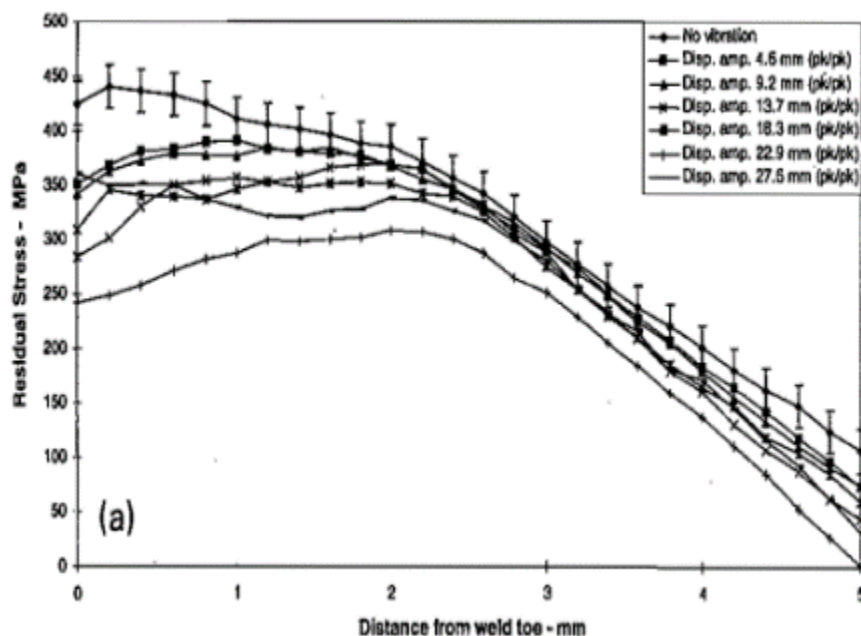
Munshi و همکارانش [۵۸، ۵۷، ۵۱] کارهای تجربی زیادی روی تنش‌زدایی ارتعاشی در حین جوشکاری و پس از جوشکاری انجام داده و کاهش چشم‌گیر تنش پسماند را در محیط آزمایشگاه و با استفاده از دامنه ارتعاشی زیاد مشاهده کرده است. اما توجه کمی به اثر فرکانس رزونانس، که تأثیر بیشتری نسبت به دامنه دارد، داشته است. این محقق همچنین به بررسی تغییر ریزساختار برای VSR و VWC پرداخت [۵۹]. وی به این نتیجه رسید که در VSR، در هیچ حالتی تغییر در ریزساختار اتفاق نمی‌افتد اما در VWC و در مقادیر زیاد گرمای وارده بر جوش و مقادیر زیاد تنش تغییر در ریزساختار اتفاق می‌افتد که سبب افزایش سختی نیز می‌شود. در شکل ۴-۱۰ مجموعه فراهم شده توسط ایشان برای انجام آزمایشات تنش‌زدایی ارتعاشی نشان داده شده است.



شکل ۴- ۱۰: تجهیزات تنش‌زدایی ارتعاشی به کار گرفته شده توسط Munsif [۵۷]

البته همان‌طور که در این شکل نشان داده است این آزمایش مربوط به تنش‌زدایی ارتعاشی در حین جوشکاری می‌باشد. تنش‌های پسماند بدون تنش‌زدایی و با تنش‌زدایی در فرکانس ۲۵ Hz و در دامنه‌های مختلف توسط X-ray اندازه‌گیری شده است. در شکل ۴- ۱۱ تنش‌های پسماند طولی و عرضی قبل و بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی آورده شده است.

این محققان با انجام آزمایش به این نتیجه نیز رسیده‌اند که برای تنش‌زدایی به زمان اندکی نیاز است و پس از مدت کوتاهی کاهش تنش ناچیز خواهد بود. البته ایشان تنها به بررسی فرکانس‌های کمتر از فرکانس تحریک پرداخته‌اند به این دلیل که با توجه به جابجایی زیاد قطعه در فرکانس تحریک امکان جوشکاری حین تنش‌زدایی ارتعاشی موجود نبوده است.



شکل ۴- ۱۱: تنش پسماند طولی در جوش بعد از تنش‌زدایی ارتعاشی [۵۷]

Rao و همکارانش [۵۶] نیز به بررسی VSR برای فولاد ضد زنگ 304L پرداخته‌اند و رابطه‌ای تجربی برای میزان کاهش تنش پسماند برای این فولاد ارائه کرده‌اند. در این تحقیق به بررسی خزش سیکلی پرداخته شده است و با توجه به نتایج

آزمایش صورت پذیرفته (شکل ۴-۷) رابطه‌ای برای خزش سیکلی بر حسب مشخصات و ثوابت ماده و تعداد سیکل ارائه شده است و سپس با ضرب کردن این کرنش در مدول یانگ میزان تغییرات تنش در فرایند VSR به دست آمده است. این رابطه در زیر آمده است.

$$\Delta\sigma = E * \varepsilon_r = 1.05 * 10^{-5} * K * E * \sigma_d * \left(1 - \exp\left(-1.1364 * \frac{N}{\sigma_d}\right)\right) \quad (۴-۱)$$

که در این رابطه σ_d دامنه تنش نوسانی و K نسبت تنش پسماند به تنش تسلیم می‌باشد که تقریباً برابر با یک می‌باشد. در مقایسه انجام شده بین این رابطه و نتایج تجربی VSR (برای یک قطعه ۳۴۰۰۰ کیلوگرمی) حداکثر خطای ۱۱٪ مشاهده شده است.

Kwofie [۶۰] نیز در سال ۲۰۰۹ یک مدل پلاستیسیته برای فرایند VSR ارائه کرده است. بر این اساس، پلاستیسیته محلی که در فرایند VSR اتفاق می‌افتد ترکیبی از آرامش تنش وابسته به چرخه^{۱۹} و خزش سیکلی می‌باشد. وی از نرم‌افزار Matlab/Simulink برای تحلیل معادلات پلاستیسیته خود استفاده کرده است. ایشان به رابطه زیر برای کاهش تنش پسماند رسیده‌اند.

$$\Delta\sigma_R = (\sigma_{pk0} - \sigma_{ys}) \left[1 - \exp\left(\frac{-4\varepsilon_a N \theta_0}{\sigma_{ys}}\right)\right] \quad (۴-۲)$$

که در اینجا σ_{pk0} تنش پیک اولیه، σ_{ys} تنش تسلیم و ε_a دامنه کرنش نوسانی می‌باشد.

Zhang و Lv [۶۱] تأثیر همزمان تنش‌زدایی ارتعاشی و تنش‌زدایی حرارتی (TVSR) را با استفاده از روش‌های تجربی و المان محدود مورد بررسی قرار داده و دریافته‌اند که این روش کارایی بیشتری نسبت به روش VSR دارد. Gao و همکارانش [۶۲، ۶۳] به تأثیر تنش‌زدایی ارتعاشی بر عمر خستگی آلیاژ Ti-6Al-4V و Al 7075 پرداخته‌اند و مشاهده کردند که تنش‌زدایی ارتعاشی با دامنه کم، سبب آسایش تنش شده و در عین حال تأثیر کمی روی عمر خستگی دارد اما در صورتی که دامنه ارتعاش زیاد باشد، عمر خستگی می‌تواند تا حدود ۱۰٪ کاهش یابد.

مقایسه تنش‌زدایی حرارتی و ارتعاشی روی فولاد ASTM A106 در مرجع [۶۴] صورت پذیرفته است. برای تنش‌زدایی حرارتی، نمونه‌ها با نرخ 315C/h تا دمای ۶۵۰ درجه افزایش یافته و سپس در این دما برای ۳۰ دقیقه نگه داشته می‌شوند. سپس کوره خاموش شده تا به آرامی خنک شوند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با روش تنش‌زدایی ارتعاشی هیچ تغییری در خصوصیات مکانیکی ماده مانند تنش کششی یا ازدیاد طول اتفاق نمی‌افتد اما در با روش تنش‌زدایی حرارتی، مقاومت کششی کاهش و ازدیاد طول افزایش یافته است. مراجع [۶۵-۶۸] به اثرات روش VWC بر تنش‌های پسماند، سختی و ریزساختار

¹⁹ cycle-dependent stress relaxation

فلزات مختلف پرداخته‌اند. مراجع [۶۹، ۷۰] نیز به صورت تجربی اثر تنش‌زدایی ارتعاشی بر تنش‌های پسماند جوش را بررسی کرده‌اند.

Tatar و همکاران [۷۱] در دانشگاه بوعلی سینا همدان به بررسی اثر تنش‌زدایی ارتعاشی بر کاهش پسماند جوش پرداخته‌اند. برای این منظور آن‌ها از دستگاه خستگی مستقر در دانشگاه استفاده کرده و با استفاده از آن یک میله باریک که روی آن جوش زده‌اند، را به نوسان درآورده‌اند. شبیه‌سازی المان محدود در نرم افزار ABAQUS انجام پذیرفته و با استفاده از روش Hole-Drilling نیز تنش‌های پسماند محاسبه شده‌اند. در جدول زیر نتایج این تحقیق برای تنش پسماند عرضی جوش آورده شده است.

جدول ۴-۶: تأثیر تنش‌زدایی ارتعاشی بر تنش پسماند عرضی جوس فولاد آستینیتی [۷۱]

	Numerical Results			Experimental Results			Error
	Residual Stresses (MPa)	Relieved Stresses (MPa)	% Reduction	Residual Stresses (MPa)	Relieved Stresses (MPa)	% Reduction	
Before Vibration	257	-	-	263.74	-	-	-
FiED 0.25 mm	109	148	57.59	105.51	158.23	59.99	2.4
FiED 0.50 mm	41.3	215.7	83.93	72.402	189.338	71.79	12.14
FiED 0.75 mm	37.0	220	85.6	45.69	218.05	82.67	2.93

Gong و همکارانش [۷۲] نیز به بررسی تأثیر تنش‌زدایی ارتعاشی بر Shape Stability یک قطعه جدار نازک از آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته‌اند و مشاهده کردند که شکل و سایز قطعه‌ای که در اثر ساخت و وجود تنش پسماند دچار مشکل شده بود با انجام تنش‌زدایی ارتعاشی بهبود چشمگیری پیدا کرد. Jafari و همکارانش [۷۳] در دانشگاه آزاد و شرکت ماشین‌سازی اراک به بررسی اثر تنش‌زدایی ارتعاشی بر جوش فولاد A516 پرداخته‌اند. ایشان اثر تنش‌زدایی ارتعاشی بر سختی و مقاومت به ضربه را مورد مطالعه قرار داده و نتایج به دست آمده را با تنش‌زدایی حرارتی مقایسه نموده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که ریز ساختار ماده در اثر تنش‌زدایی ارتعاشی و حرارتی تقریباً یکسان بوده و تنش‌زدایی ارتعاشی تأثیر خوبی بر مقاومت به ضربه و سختی دارد.

Kuang [۷۴] تنش‌زدایی ارتعاشی را با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و با فرض یک توزیع تنش (بدون شبیه‌سازی مستقیم جوش) مدل کرد. در ادامه این کار دو کار تقریباً مشابه توسط Yang [۷۵] و Zhao و همکارانش [۷۶] به چاپ رسیده است که به بررسی المان محدود آزمایشات انجام گرفته توسط Munsiri پرداخته‌اند. در این مقالات ابتدا مدل‌سازی تنش‌های پسماند جوش آورده شده و سپس به بررسی تأثیر تنش‌زدایی در فرکانس‌های طبیعی و فرکانس‌های کمتر از فرکانس طبیعی بر تنش‌های پسماند جوشکاری پرداخته‌اند.

۸-۴- تنش زدایی ارتعاشی در فرکانس رزونانس

روش تنش زدایی در فرکانس تحریک در ابتدا توسط شرکت VSR Technology Group مورد استفاده گسترده قرار گرفته است. تجهیزات مورد استفاده در این روش بسیار مشابه با روش تنش زدایی در فرکانس کمتر از فرکانس تحریک است. تجهیزات مورد استفاده در این روش عبارتست از:

۱- حداقل سه عدد بالشتک (Isolation Load Cushions) برای قرار دادن سازه روی آنها

۲- شتاب سنج

۳- نوسانگر یا Vibrator

۴- کامپیوتر یا کنسول کنترل دستگاه

سازه روی باید روی حداقل سه عدد بالشتک قرار گیرد. انتخاب تعداد بالشتکها وابسته به سازه و هندسه سازه است. محل قرارگیری این بالشتکها بسیار مهم می باشد. بالشتکها را نباید در نزدیکی گوشه ها قرار داد. زیرا در این صورت میرایی مجموعه بسیار افزایش یافته و ارتعاشات سیستم به شکل چشمگیری کاهش می یابد. با کاهش ارتعاشات سازه، احتمال دستیابی به نتیجه مطلوب کاهش می یابد.

نوسانگر باید در مقطعی که سفتی بسیار بالایی دارد نصب شود. محور این ارتعاش کننده باید موازی با طول قطعه باشد. نامیزانی نوسانگر این شرکت در بازه ۰/۲ الی ۴ اینچ-پوند است. بسته به سازه و شرایط قطعه، میزان مشخصی از نامیزانی انتخاب می شود و سپس در صورت نیاز کاهش یا افزایش می یابد. مقدار نامیزانی باید به اندازه ای باشد که سبب ایجاد دامنه ارتعاش مناسب در سازه شود و همچنین سبب حرکت سازه روی بالشتکها و ارتعاش خارج از کنترل سازه نشود.

سنسور شتاب سنج باید در یکی از گوشه های سازه نصب شود و ترجیحا باید در محلی باشد که بیشترین ارتعاش را دارد. در شکل ۴-۱۲ تجهیزات استفاده شده برای تنش زدایی ارتعاشی نمایش داده شده است. دو بالشتک در وسط قطعه و در جلوی تصویر و یک بالشتک در وسط قطعه و در پشت تصویر در زیر سازه قرار داده شده است. سنسور شتاب سنج نیز در گوشه تصویر قابل مشاهده است. نوسانگر نیز در وسط سازه روی یک فریم با صلیبیت مناسب قرار داده شده است. وزن کل سازه ۵۰۰ کیلوگرم می باشد. جهت اطمینان از عدم حرکت افقی سازه در حین انجام تنش زدایی، یک تسمه به سازه متصل شده است.



شکل ۴-۱۲: تجهیزات مورد استفاده برای تنش زدایی فریم ۵۰۰ کیلوگرمی

در شکل زیر نوسانگر نمایش داده شده است. نوسانگر با استفاده از دو گیره به سازه متصل می‌شود. نامیزانی نوسانگر را می‌توان با استفاده از صفحه مدرج در پشت نوسانگر تعیین نمود.



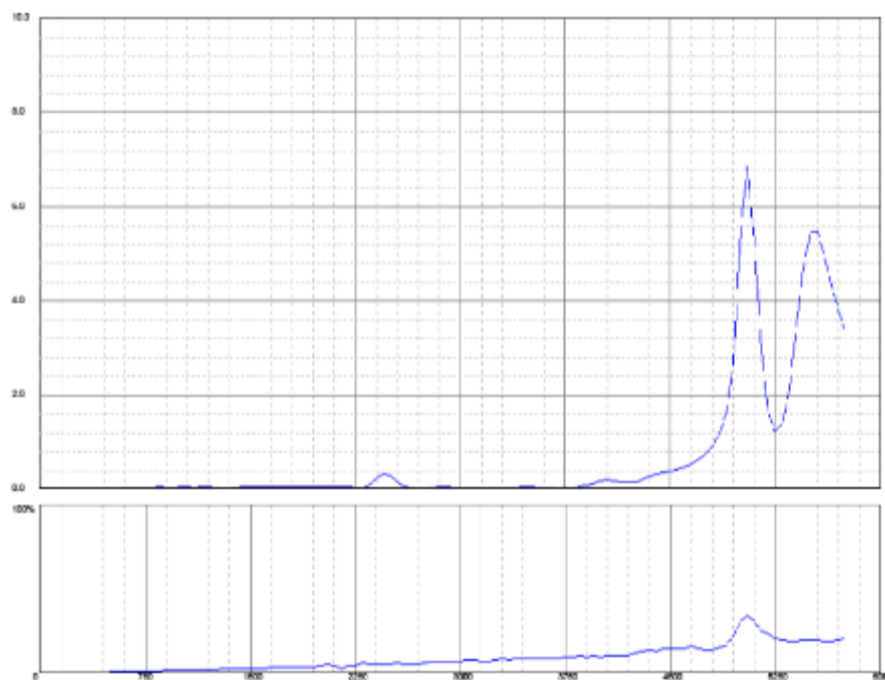
شکل ۴-۱۳: نوسانگر مورد استفاده در دستگاه MX-8000



شکل ۴- ۱۴: پکیج کامل دستگاه VSR 8000

بعد از اتمام نصب تجهیزات تنش زدایی ارتعاشی روی سازه، ابتدا یک اسکن سریع (Quick-Scan) انجام می‌شود. این کار جهت کالیبره کردن دستگاه و در نرخ 50 rpm/sec انجام می‌پذیرد. با توجه به اینکه تا سرعت 6000 rpm اسکن انجام گرفته است، این کار در حدود دو دقیقه زمان می‌برد. در شکل زیر نتیجه این اسکن اولیه نشان داده شده است. نمودار بالایی داده‌های مربوط به شتاب سنج و نمودار پایینی قدرت موتور را نمایش می‌دهد. محور افقی نیز سرعت موتور نوسانگر است. پیک‌های ایجاد شده در نمودار بالایی بیانگر رزونانس سازه و پیک در نمودار پایین بیانگر رزونانس‌هایی است که سبب شده موتور جریان بیشتری را بکشد. در صورتی که در نمودار پایین پیک‌های بزرگی مشاهده شود بایستی نامیزانی نوسانگر را کاهش داد و یا با تغییر محل بالشتک‌ها از ارتعاش زیاد سازه خودداری کرد.

محدوده عملکردی شتاب سنج $1-50 \text{ g}$ است که در اینجا شتاب ایجاد شده در سازه در بازه $1-10 \text{ g}$ است. توان موتور استفاده شده در نوسانگر 3 HP یا 2.2 kW است. موتور استفاده شده از نوع موتور DC بدون جاروبک است. در اینجا از تمام توان موتور استفاده شده است. سرعت این موتور قابل افزایش تا 8000 rpm است که در اینجا تا 6000 rpm دور موتور افزایش یافته است و فرکانس‌های طبیعی سازه در این بازه، اندازه‌گیری شده است. با استفاده از اسکن سریع می‌توان، محدوده اولیه فرکانس‌های رزونانس، محدوده شتاب، نامیزانی نوسانگر و موقعیت مناسب نوسانگر را تعیین نمود.

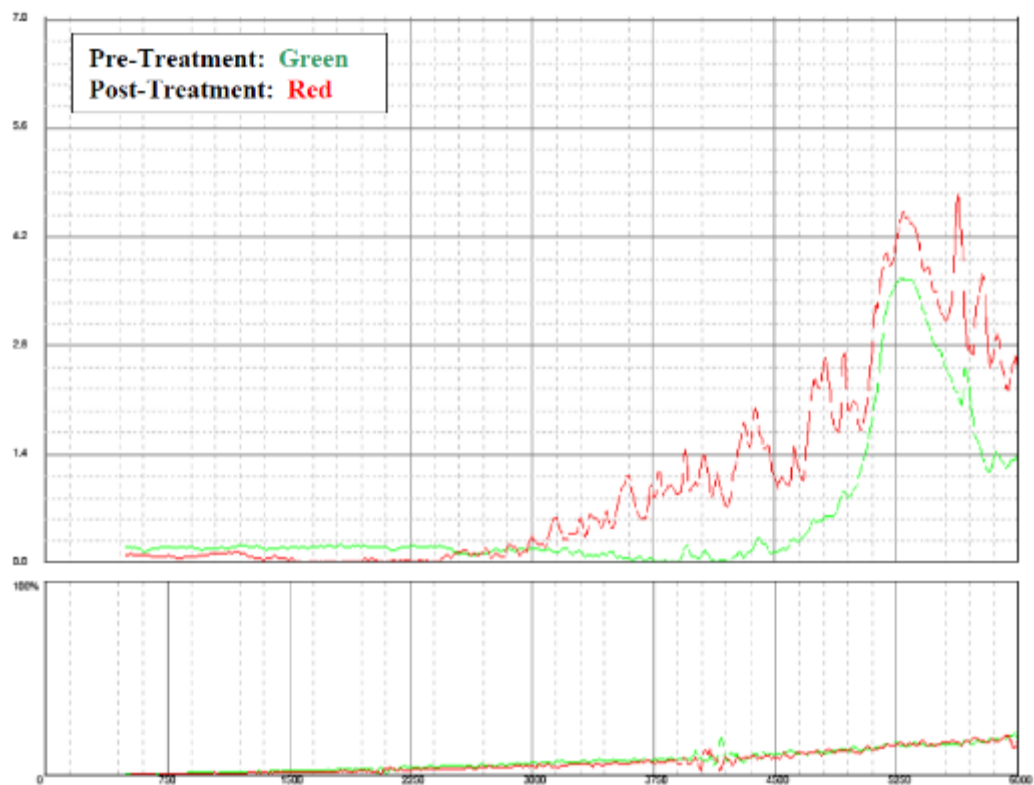


شکل ۴- ۱۵: نمودار Quick-Scan یک سازه ۵۰۰ کیلوگرمی

آزاد سازی تنش سبب دو تغییر در نمودار فوق می‌شود:

- ارتفاع پیک رزونانس را افزایش می‌دهد.
- یک شیفت به سمت فرکانس کمتر در نمودار آن ایجاد می‌شود.

پس از اسکن سریع و تعیین پارامترهای اولیه برای انجام تنش زدایی، دستگاه با نرخ کمتری نسبت به اسکن سریع و با نرخ توصیه شده 10 rpm/sec شروع به اسکن دوباره کرده و پیک‌ها را شناسایی می‌کند. سپس در هر کدام از پیک‌ها برای بازه حدوده نیم ساعت سرعت نوسانگر ثابت می‌ماند تا تنش زدایی انجام شود. در صورتی که ارتفاع پیک بیشتر شود و پیک به سمت راست شیفت کند، اطمینان حاصل می‌شود که تنش زدایی در آن فرکانس انجام گرفته و سراغ فرکانس رزونانس بعدی می‌رود. پس از اتمام مرحله Pre-Treatment که در شکل ۴-۱۶ با رنگ سبز نمایش داده شده است، دستگاه یکبار دیگر اسکن انجام می‌دهد که با رنگ قرمز در شکل ۴-۱۶ نمایش داده شده است. به این اسکن Post-Treatment می‌گویند. همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است پس از انجام تنش زدایی، ارتفاع تمامی پیک‌ها افزایش و فرکانس آن‌ها کاهش یافته است که موید انجام تنش زدایی در سازه است.



شکل ۴-۱۶: نمودار Pre-Treatment و Post-Treatment سازه ۵۰۰ کیلوگرمی

در ادامه تصاویر محل قرارگیری بالشتک‌ها و نوسانگر روی یک سازه بسیار بزرگ آورده شده است. این سازه ابعاد بسیار بزرگی دارند و قرار دادن آن در کوره برای تنش‌زدایی حرارتی بسیار زمانبر و پرهزینه خواهد بود.



شکل ۴-۱۷: استفاده از تنش زدایی ارتعاشی جهت رفع اعوجاج یک سازه با وزن ۲۵ تن

۴-۹- تنش زدایی در فرکانس کمتر از فرکانس تحریک

یکی از شرکت‌های بسیار قدیمی و فعال در حوزه تنش زدایی ارتعاشی، شرکت Bonal Technology است که محصولاتی با نام تجاری META-LAX را عرضه کرده است. در شکل ۴-۱۸ برخی از مدل‌های این شرکت نمایش داده شده است. این شرکت قراردادهای متنوعی با شرکت‌های نظامی داشته و حتی برای NASA نیز تنش زدایی ارتعاشی را انجام داده است. در سال ۲۰۰۲ این شرکت در حدود ۲ میلیون دلار پروژه در این زمینه انجام داده است.

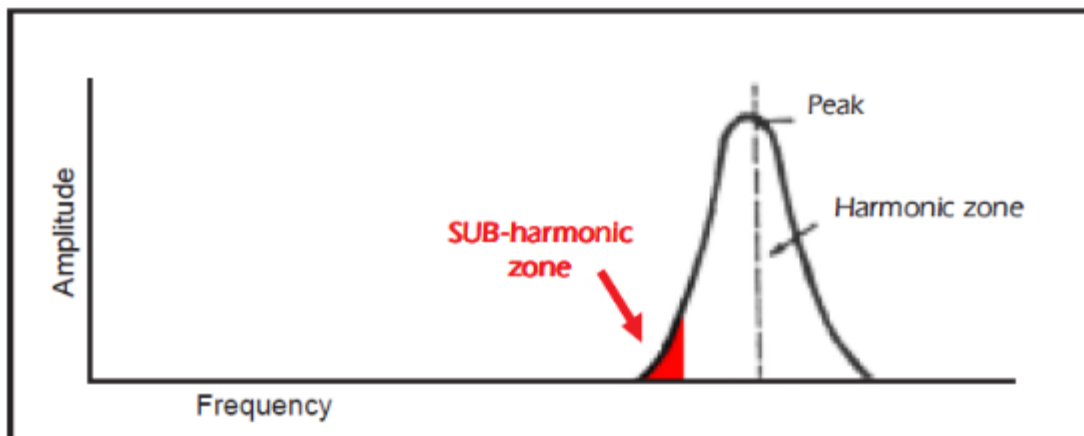


شکل ۴- ۱۸: کنسول‌های دستگاه تنش زدایی مدل META-LAX



شکل ۴- ۱۹: تنش زدایی ارتعاشی روی شاتل

در این روش ابتدا با استفاده از یک Quick-Scan نمودار رزونانسی سازه به دست می‌آید. سپس در فرکانسی معادل با یک سوم ارتفاع پیک هارمونیک و برای مدت زمان ۲۰ دقیقه، سازه تحت ارتعاش قرار می‌گیرد. در شکل ۴-۲۰ تعیین فرکانس تحریک با توجه به پیک هارمونیک سازه نشان داده شده است. در شکل ۴-۲۱ نیز تنش‌زدایی ارتعاشی با استفاده از تجهیزات شرکت META-LAX نمایش داده شده است.

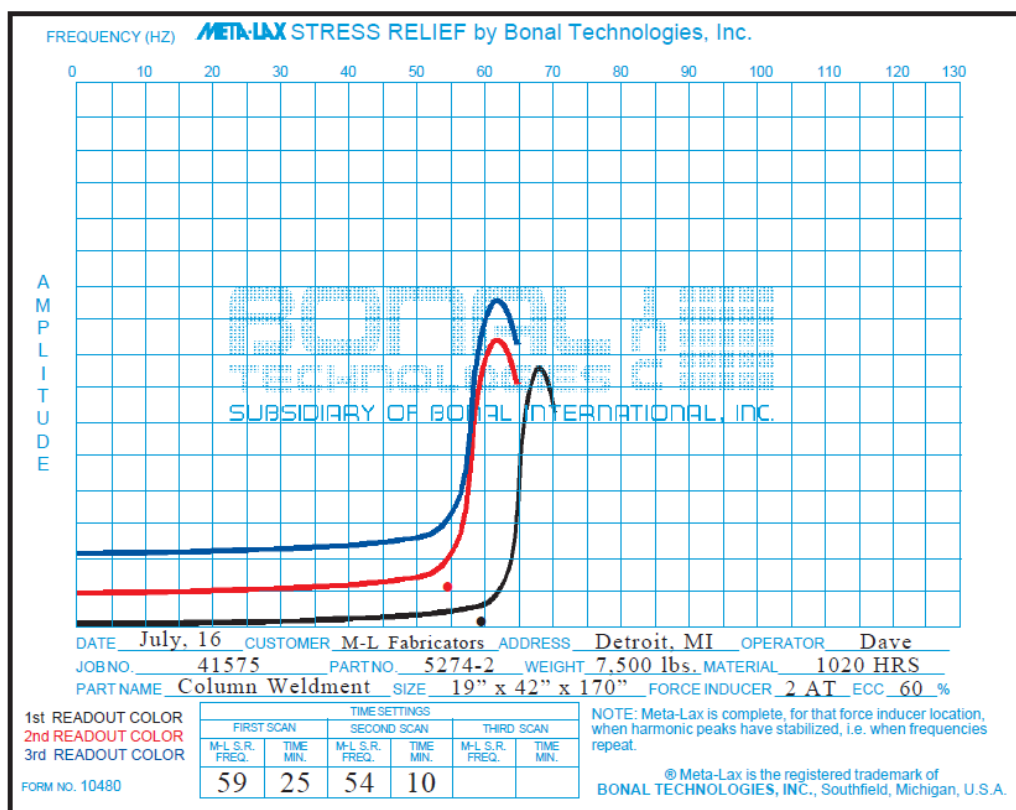


شکل ۴- ۲۰: فرکانس استفاده شده برای انجام تنش زدایی



شکل ۴- ۲۱: تنش زدایی ارتعاشی با استفاده از META-LAX

در این روش نیز همانند حالت قبل پس از تنش زدایی، فرکانس رزونانس کاهش می یابد و همچنین پیک رزونانس با انجام تنش زدایی افزایش می یابد. در شکل زیر نمودار مشکی رنگ مربوط به Quick-Scan است. نمودار قرمز رنگ مربوط به Pre-Treatment و نمودار آبی رنگ نیز مربوط به Post-Treatment می باشد. شیفت نمودار به سمت فرکانس های پایین تر با انجام تنش زدایی کاملاً مشهود است.



شکل ۴-۲۲: نمودار دامنه نوسان قبل و بعد از تنش زدایی ارتعاشی با دستگاه META-LAX

۴-۱۰- امکان استفاده از دستگاه تنش زدایی ارتعاشی

تا کنون استفاده از دستگاه تنش زدایی ارتعاشی توسط ASME و یا دیگر نهادهای مربوطه به عنوان یک روش قطعی برای کاهش تنش پسماند و اصلاح هندسی سازه‌ها مورد پذیرش قرار نگرفته است. از طرفی تا کنون هیچ مرجعی استفاده از روش تنش زدایی ارتعاشی را منع نکرده است. شاید به همین دلیل است که استفاده از این روش نسبتاً محدود می‌باشد. با این حال برای سازه‌های بسیار بزرگ، قطعاً یکی از سریع‌ترین راه‌ها برای رفع مشکل اعوجاج به دلیل تنش پسماند، استفاده از تنش زدایی ارتعاشی است. زیرا هزینه تمام شده بسیار پائینی دارد و نیاز به استفاده از کوره‌های بزرگ، حمل و نقل و انرژی زیاد برای تنش زدایی حرارتی ندارد. علاوه بر این با توجه به اینکه زمان محدودی سازه تحت تنش زدایی ارتعاشی قرار می‌گیرد به همین دلیل بر عمر خستگی سازه تأثیر نامطلوبی نخواهد داشت. همچنین در صورتی که جوش‌هایی در سازه وجود دارد که امکان تنش‌گیری آن‌ها وجود ندارد و یا تحت بار خستگی زیاد قرار می‌گیرند بهتر است که با استفاده از روش آلتراسونیک پینینگ تنش پسماند فشاری در جوش ایجاد کرد و همچنین با اصلاح هندسه جوش تمرکز تنش در جوش را کاهش داد.

۴-۱۱- تجهیزات مورد نیاز برای ساخت دستگاه تنش زدایی ارتعاشی

تجهیزات مورد نیاز برای ساخت یک دستگاه تنش زدایی ارتعاشی عبارتند از:

۱- موتور الکتریکی با یک نامیزانی متصل به آن

- ۲- درایو موتور
- ۳- بالشتک‌های پلیمری
- ۴- سنسور شتاب سنج
- ۵- دیتالاگر
- ۶- کامپیوتر

با توجه به نیاز به درایو برای تنظیم دور موتور، معمولاً از موتورهای بدون جاروبک DC برای تنش زدایی ارتعاشی استفاده می‌شود. نامیزانی را می‌توان به صورت یک دیسک متصل به محور موتور که روی آن قابلیت تغییر مکان یک جرم نامیزان وجود دارد در نظر گرفت. سنسور شتاب سنج باید کالیبره باشد و گواهی کالیبراسیون داشته باشد. داده‌های موتور و سنسور شتاب سنج وارد دیتالاگر شده و سپس وارد کامپیوتر می‌شود.

تمام موارد بالا در حال حاضر امکان خرید دارند و در صورتی که بودجه مناسب برای آن در نظر گرفته شود، می‌توان با هزینه ای نه چندان زیاد تجهیزات را خریداری و آماده کرد و به عنوان یک هاب برای صنعت برق، به تنش زدایی سازه های جوشکاری شده در صنعت برق پرداخت.

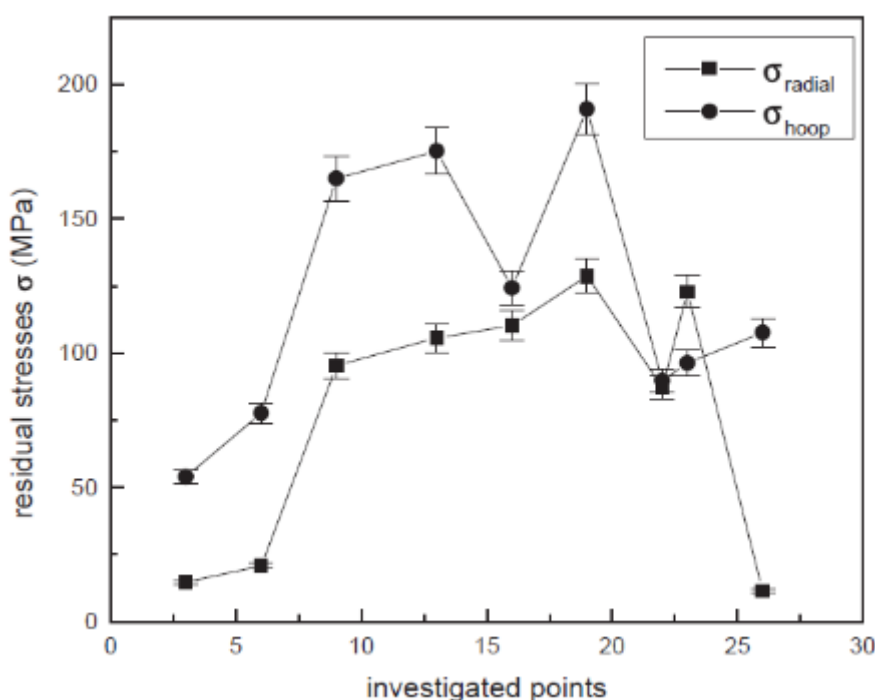
۵- فصل پنجم: مرور ادبیات تنش‌های پسماند در کاربرد نیروگاهی

۵-۱- مقدمه

در این فصل برخی از مسائل مرتبط با تنش‌های پسماند، روش‌های اندازه‌گیری و تأثیر تنش‌های پسماند بر عمر و عملکرد تجهیزات نیروگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به وسعت زیاد تجهیزات و مواد به کار رفته در نیروگاه‌ها، امکان بررسی تمام مقالات وجود نداشته و تنها برخی از مقالات در برخی از تجهیزات مطالعه شده‌اند.

۵-۲- توربین و کمپرسور

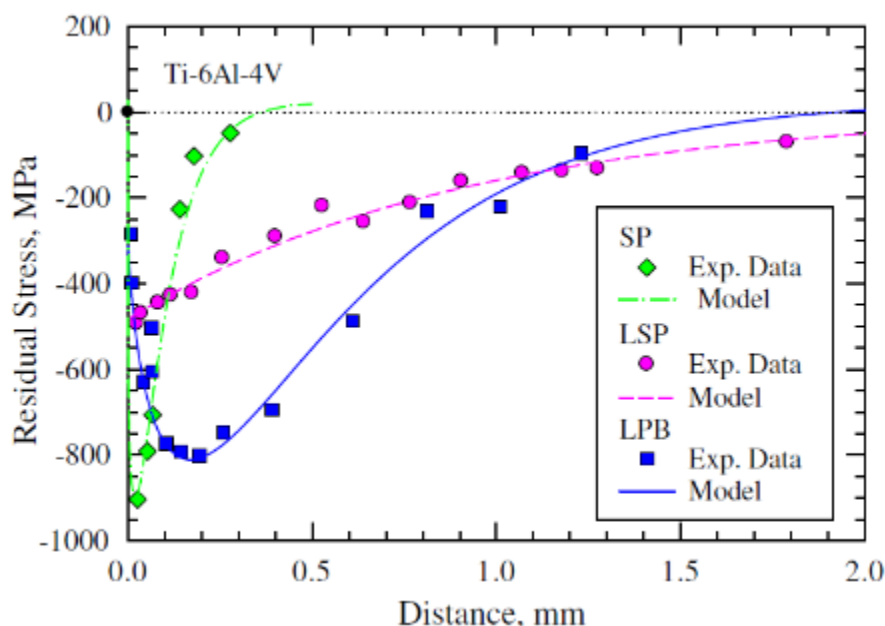
در سال ۲۰۰۴، Rogante و همکارانش [۷۷] به اندازه‌گیری تنش پسماند در wheel کمپرسور محوری یک توربین گاز پرداختند. در این قطعه به دلیل پروسه ساخت و یا خستگی در حین فعالیت تنش پسماند باقی مانده است. ماده از جنس NiCrMoV می‌باشد. اندازه‌گیری به وسیله پراش نوترونی انجام پذیرفته است. تنش پسماند محیطی در محدوده 50–200 MPa و تنش شعاعی در محدوده 10–130 MPa اندازه‌گیری شد که می‌تواند عامل مهمی در تعیین عمر wheel کمپرسور باشد.



شکل ۵-۱: تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده در محور کمپرسور محوری [۷۷]

همان طور که در فصول قبل ذکر شد، جهت استفاده از روش‌های مبتنی بر پراش، بایستی ابعاد دانه‌ها نسبتاً کوچک باشد. این در حالی است که در پره توربین‌های گازی، برای حذف اثر مخرب مرزدانه‌ها در خزش، ابعاد دانه‌ها بسیار بزرگ بوده و در نتیجه امکان استفاده از روش‌های غیرمخرب مرسوم، مانند XRD وجود ندارد. Kawamura [۷۸] برای اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین گاز، با استفاده از روش‌های تعیین انحنای لایه بریده شده و همچنین با استفاده از لایه برداری، موفق به اندازه‌گیری تنش پسماند با دقت مناسبی شدند.

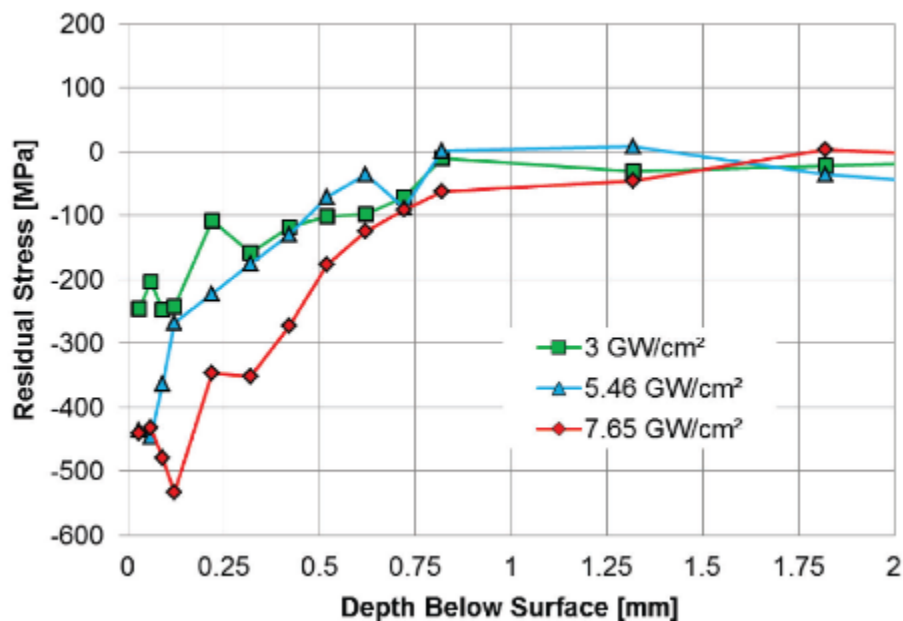
با توجه به اینکه خستگی سایشی در تماس بین دو جسم که نسبت به یکدیگر لغزش دارند اتفاق می‌افتد و می‌تواند سبب ایجاد عیب در کل سازه شود، در تحقیق انجام گرفته توسط Chan و همکارانش [۴۲] تأثیر عملیات‌های مختلف برای اعمال تنش پسماند فشاری بر عمر خستگی سایشی محل اتصال پره‌ها به دیسک در یک توربین گاز مورد تحقیق گرفت. این تحقیق به کمک المان محدود انجام گرفته و روش‌های لیزر پینینگ، LPB و ساچمه‌زنی مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل زیر تنش پسماند فشاری ناشی از این سه فرایند نمایش داده شده است. با بررسی‌های انجام گرفته مشخص گردید که هر سه روش قادر به افزایش قابل توجه عمر دیسک تحت خستگی سایشی هستند.



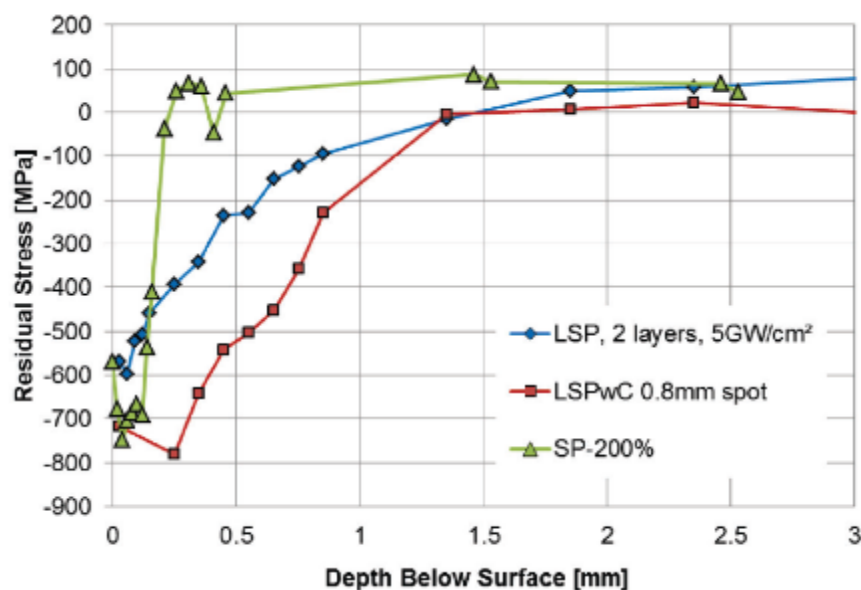
شکل ۲-۵: تنش پسماند فشاری ناشی از سه فرایند لیزر پینینگ، LPB و ساچمه زنی [۴۲]

SUNDAR و همکارانش [۷۹] به بررسی اثر فرایند لیزر پینینگ بر تنش پسماند ریشه پره توربین بخار پرداخته‌اند. در این تحقیق مشخص گردید که با استفاده از این روش، تنش پسماند در 260 MPa الی 390 MPa در شیار ریشه پره ایجاد می‌شود و هیچ تغییری در توپولوژی این ناحیه مشاهده نمی‌شود.

Polese و همکارانش [۸۰] به بررسی تأثیر فرایند لیزرپینینگ بر تنش پسماند فولاد 12Cr جهت استفاده در پره مرحله آخر توربین بخار پرداختند. در این تحقیق دو حالت لیزرپینینگ با پوشش محافظ (LSP) و لیزر پینینگ بدون پوشش محافظ (LSPwC) مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌ها از fir-tree پره مرحله آخر توربین بخار استخراج شدند. در شکل ۳-۵ تأثیر توان لیزر بر میزان تنش پسماند ایجاد شده در نمونه‌ها برای حالت LSP نمایش داده شده است. در شکل ۴-۵ نیز تأثیر دو فرایند LSPwC، LSP و همچنین ساچمه‌زنی بر تنش پسماند نشان داده شده است. کاملاً واضح است که روش لیزرپینینگ توانایی تولید تنش پسماند در اعماق بالاتر را دارد. برای اندازه‌گیری تنش پسماند از دو روش XRD و synchrotron XRD استفاده شد.

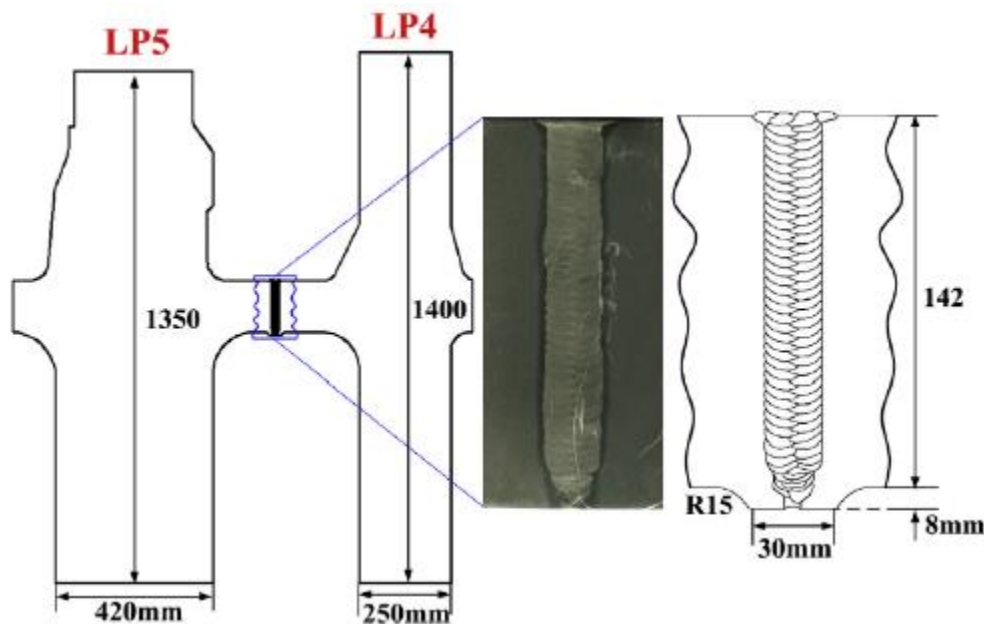


شکل ۳-۵: تأثیر توان لیزر بر میزان تنش پسماند ایجاد شده [۸۰]



شکل ۴-۵: تأثیر دو فرایند LSP و LSPwC و همچنین ساچمه‌زنی بر تنش پسماند [۸۰]

در حال حاضر روتور بسیاری از توربین‌های بخار با استفاده از جوشکاری دو یا چند روتور با طول کمتر ساخته می‌شود. با این کار هزینه ساخت و حمل و نقل آن بسیار کاسته می‌شود. در شکل زیر یک نمونه از روتور یک توربین بخار (کاربرد در نیروگاه هسته‌ای) نمایش داده شده است که دو بخش روتور با یک جوش ۸۹ پاسه به یکدیگر متصل شده‌اند. Tan و همکارانش [۸۱] به بررسی این موضوع پرداخته و با کمک المان محدود، تأثیر تنش پسماند ناشی از جوشکاری و همچنین تنش پسماند پس از PWHT را بر عملکرد روتور مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق تنش‌های پسماند پس از PWHT با تنش‌های کاری به صورت خطی جمع شده‌اند.

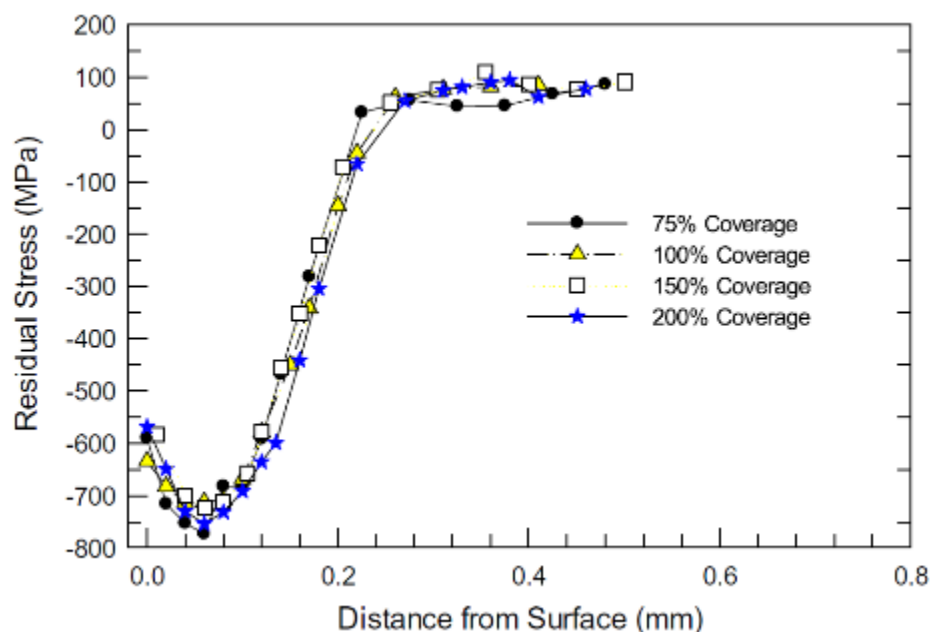


شکل ۵-۵: نمونه از اتصال دو بخش روتور یک توربین بخار به کمک جوشکاری [۸۱]

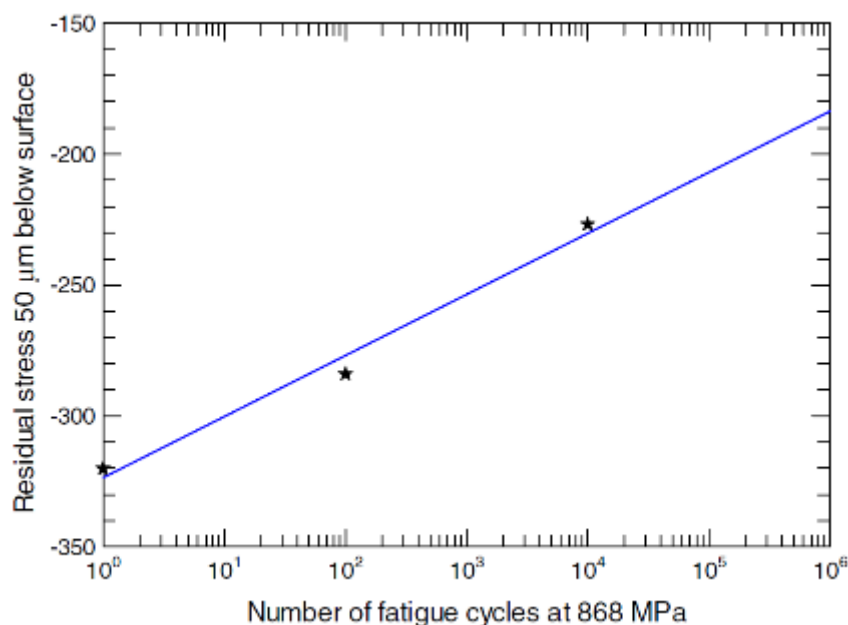
با توجه به دمای بسیار بالای توربین گاز، نیاز است که برای به حداقل رسیدن اثرات خزش، تا حد ممکن تعداد مرزدانه ها را کم کرد. به همین جهت امروزه از پره های تک کریستالی از جنس سوپرآلیاژ نیکل استفاده می شود. در حین ساخت این پره ها و خصوصا در هنگام کوئنچ کردن در نقاط مختلف پره و خصوصا بین کانال های خنک کاری که گرادیان دما در آن نقاط زیاد است، کرنش های پسماند ایجاد می شود که نیاز است تا مقادیر تنش پسماند ایجاد شده با دقت اندازه گیری و کنترل شوند. از طرفی با توجه به تک کریستاله بودن پره ها، اندازه گیری تنش با استفاده از روش های غیر مخرب بسیار دشوار است و لازم است که تمهیداتی برای استفاده از روش های مبتنی بر پراش اندیشیده شود. در تحقیق انجام گرفته توسط Pierret و همکارانش [۸۲] با استفاده از تلفیق پراش نوترونی و تصویربرداری با استفاده از توموگرافی نوترونی، روشی برای اندازه گیری تنش پسماند در عمق یک پره توربین گاز نیروگاهی ارائه شده است.

در سال ۱۹۷۴ Barton و Kusenberge موفق به ارزیابی تنش پسماند در قطعات توربین گاز با استفاده از روش نوین Barkhausen شدند [۸۳]. این اولین تحقیقی بود که در آن با استفاده از روش مغناطیس، تنش پسماند در توربین گاز مورد بررسی قرار می گیرد. پره کمپرسور، دیسک کمپرسور و یاتاقان ها در این تحقیق از دو منظر تنش پسماند و وجود ترک مورد مطالعه قرار گرفتند.

NEWBY و همکارانش [۸۴] ساچمه زنی ریشه پره توربین بخار را به صورت تجربی و با المان محدود مورد مطالعه قرار دادند. در بخش تجربی، اثر درصد پوشش ساچمه زنی بر روی تنش پسماند با استفاده از روش XRD بررسی گردیده است. در شکل ۵-۶ تأثیر درصد پوشش بر تنش پسماند نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۵-۷ تأثیر تعداد سیکل های خستگی بر آسایش تنش برای حالتی که توربین در حالت overload کار می کند، آورده شده است.



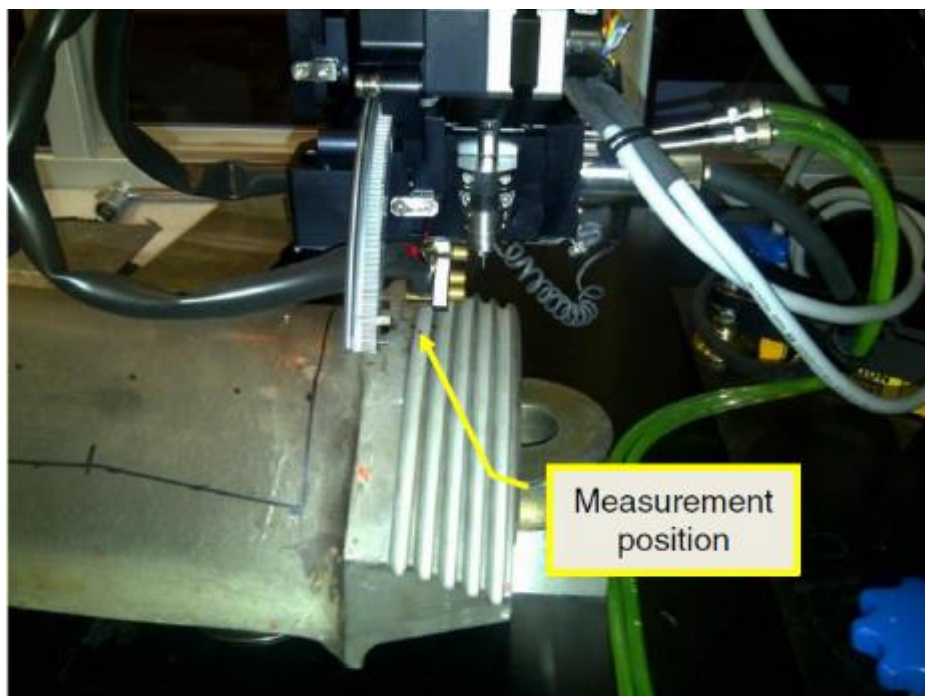
شکل ۵-۶: تأثیر درصد پوشش ساچمه زنی بر تنش پسماند با استفاده از روش XRD [۸۴]



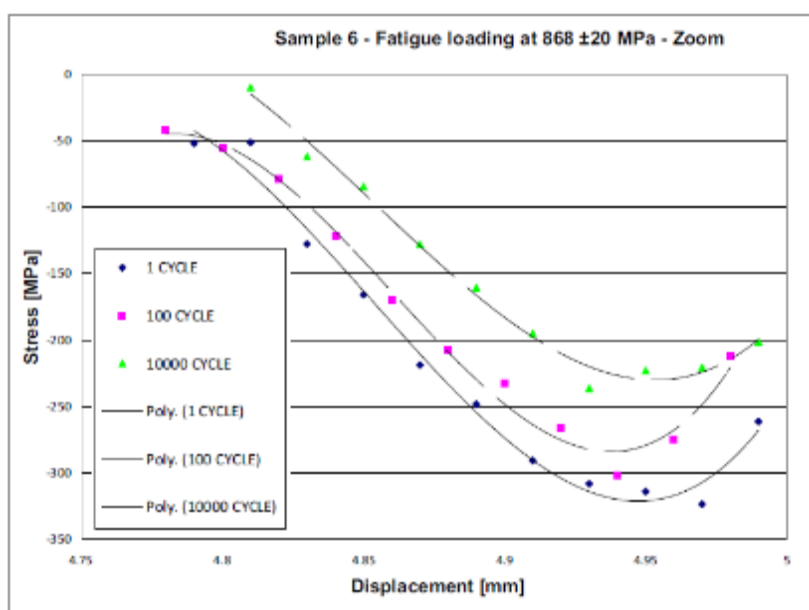
شکل ۵-۷: تأثیر تعداد سیکل‌های خستگی بر آسایش تنش برای حالتی که توربین در حالت overload کار کند [۸۴]

در شکل ۵-۸ نیز اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین بخار با استفاده از دستگاه X-Ray نمایش داده شده است. تنش‌های پسماند ناشی از ساچمه زنی و همچنین آسایش تنش پسماند فشاری تحت بار خستگی برای پره‌های توربین بخار ساخته شده از ماده 12Cr توسط James و همکارانش [۸۵] مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق از روش X-Ray و همچنین synchrotron X-ray برای اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شد. نتیجه تحقیقات نشان داد هنگامی که نمونه‌ها در تنشی نزدیک به تنش تسلیم ماده تحت بار خستگی قرار می‌گیرند، آسایش تنش قابل توجهی در همان سیکل‌های اولیه مشاهده می‌شود اما در صورتی که تنش اعمالی پایین‌تر از تنش تسلیم باشد، آسایش تنش محدود است. در شکل زیر برای تنش اعمالی

۸۶۸ MPa که تنها ۲۰ MPa کمتر از تنش تسلیم ماده است، تأثیر تعداد چرخه‌های خستگی بر مقدار تنش پسماند نمایش داده شده است.



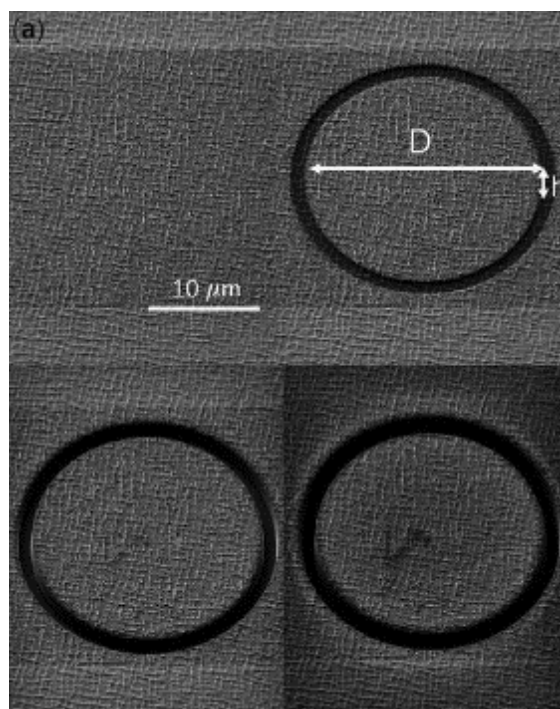
شکل ۸-۵: اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین بخار با استفاده از دستگاه X-Ray [۸۴]



شکل ۹-۵: تأثیر تعداد چرخه‌های خستگی بر مقدار تنش پسماند ناشی از ساچمه زنی در پره توربین بخار [۸۵]

Chen و همکارانش [۸۶] در سال ۲۰۲۰، تنش پسماند در جوشکاری TIG یک تک کریستال نیکل را ارزیابی کردند. برای این منظور از روش Focused Ion Beam – Digital Image Correlation (FIB-DIC) micro-ring-core یا روش باریکه یونی متمرکز بهره بردند. این روش در چند سال اخیر جهت استفاده کردند. برای ایجاد شیار از FIB یا روش باریکه یونی متمرکز بهره بردند. این روش در چند سال اخیر جهت

ماشین‌کاری در ابعاد میکرو و نانو مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از تصاویر اپتیکی نیز کرنش‌ها را اندازه‌گیری کردند. لازم به ذکر است که به دلیل تک کریستاله بودن نمونه مورد بررسی، امکان استفاده از روشهای مبتنی بر پراش وجود نداشته است. در این روش ابعاد شیارهای ایجاد شده در حد چند میکرومتر است. در شکل زیر نمایی از شیار ایجاد شده در مراحل مختلف نمایش داده شده است. قطر این شیار ۲۰ میکرون و ضخامت آن ۲ میکرون است. همچنین لایه برداری در ۶۰ مرحله انجام گرفته و عمق نهایی شیار، ۷ میکرون می‌باشد. با اندازه‌گیری‌های انجام گرفته، بیشینه تنش در حدود ۶۰۰ MPa در هر دو جهت شعاعی و محیطی مشاهده شد که با توجه به مقدار بسیار بالای تنش پسماند، نیاز به انجام PWHT ضروری خواهد بود.

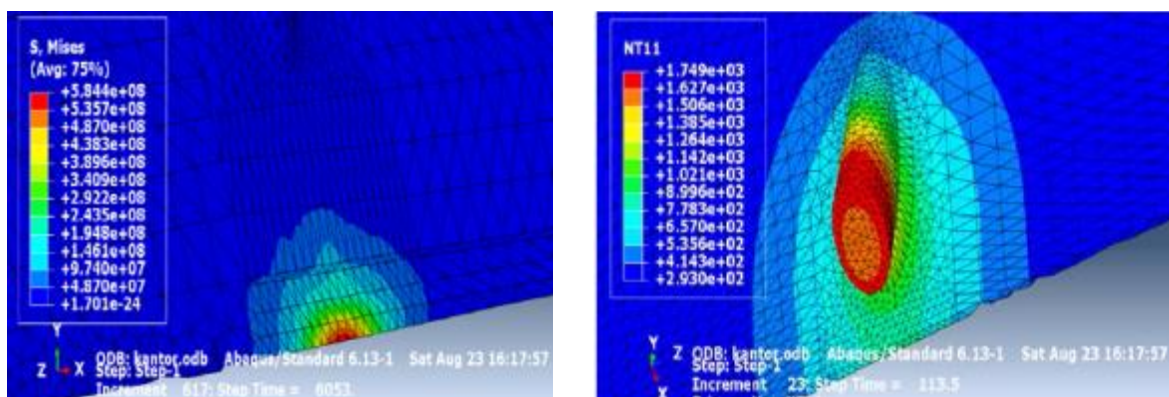


شکل ۱۰-۵: میکرو شیار ایجاد شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند [۸۶]

معمولاً در ردیف‌های انتهایی پره‌های توربین بخار از Lacing Wire جهت حفظ صلبیت مجموعه پره‌ها استفاده می‌شود. این سیم‌ها با جوشکاری به پره‌ها متصل می‌شوند که همین امر می‌تواند سبب ایجاد تنش‌های پسماند نسبتاً زیادی در مجموعه پره‌ها شود. در تحقیق انجام گرفته توسط ملامحمدی و همکاران [۸۷]، تأثیر عملیات جوشکاری بر تنش پسماند ایجاد شده در میله‌های اتصال دهنده یک توربین بخار از جنس فولاد ضد زنگ مارتنزیتی ۴۲۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. میله‌های مذکور با جوش آرگون به یکدیگر متصل می‌شوند. در شکل ۵-۱۱ کانتور دما و تنش‌های پسماند ایجاد شده ناشی از جوشکاری نمایش داده شده‌اند.

برداشت نمونه از یک توربین در حال کار و بررسی عمر باقیمانده، یکی از راهکارهای بسیار ارزشمند در تخمین عمر باقیمانده یک توربین بخار است. برای این منظور می‌توان با استفاده از روش‌های خاصی، یک نمونه برای تست خزش، از روتور برید و سپس حفره ایجاد شده را با جوش پر کرد (و پس از آن عملیات حرارتی انجام داد). James و همکارانش [۸۸] به بررسی تنش‌های پسماند ایجاد شده در روش friction taper hydro-pillar پرداختند. در این روش که به صورت شماتیک در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است، ابتدا یک سوراخ در روتور ایجاد شده و نمونه برداشته می‌شود و سپس آن سوراخ توسط روش جوش

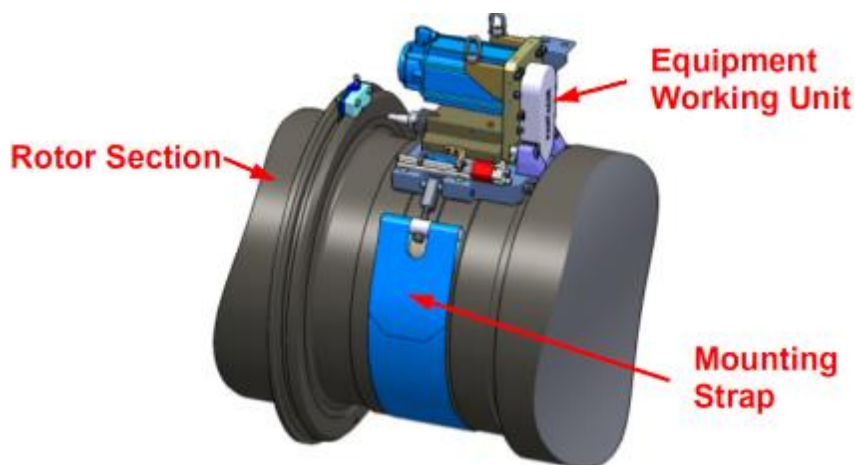
اصطکاکی پر می‌شود و عملیات حرارتی روی آن انجام می‌پذیرد. در شکل ۵-۱۳ شماتیک تمام مراحل این روش و در شکل ۵-۱۴ تصاویری از سه مرحله انجام این روش روی روتور یک توربین بخار نمایش داده شده است.



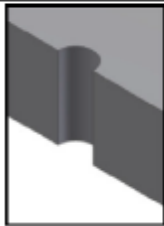
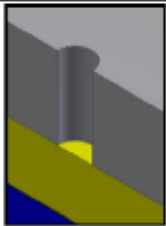
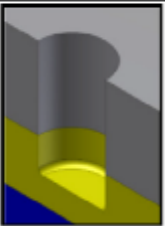
تنش پسماند ون میززا ایجاد شده ناشی از جوشکاری

کانتور دما در حین جوشکاری

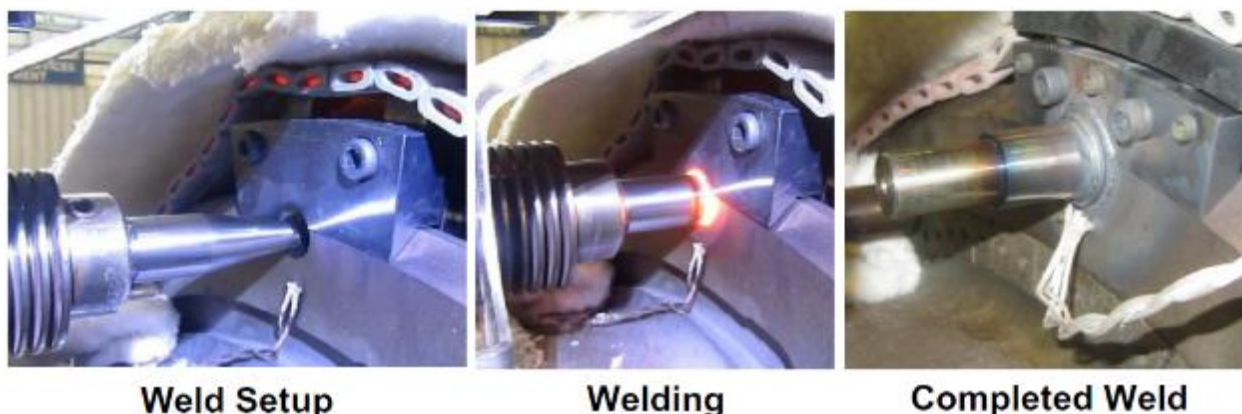
شکل ۵-۱۱: کانتور دما و تنش پسماند ایجاد شده ناشی از جوشکاری Lacing Wire پره توربین بخار [۸۷]



شکل ۵-۱۲: شماتیکی از دستگاه FTHP که یک نمونه از بخش T شکل روتور جدا میکند. [۸۸]

1	2	3	4	5	6
Damaged hole in component	Introduction of backing plate	Machining of damaged hole	FTHP and PWHT	Machining of excess material	Drilling of new hole
					

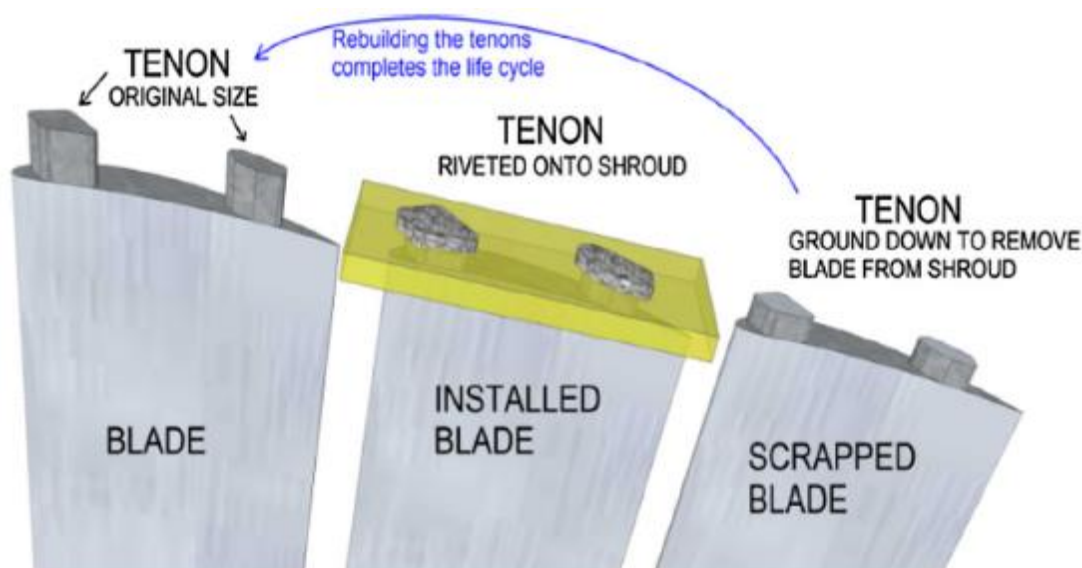
شکل ۵-۱۳: مراحل نمونه برداری و تعمیر با استفاده از روش FTHP [۸۹]



شکل ۱۴-۵: مراحل سوراخکاری و جوشکاری با استفاده از روش FTHP روی یک روتور توربین بخار [۸۸]

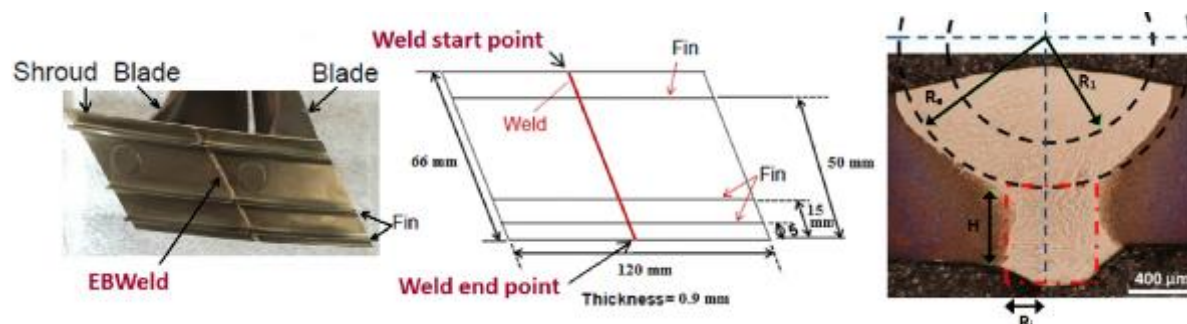
با اندازه‌گیری مقادیر تنش پسماند قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری در فرایند FTHP مشخص گردید که انجام عملیات تنش زدایی حرارتی سبب کاهش چشمگیر تنش‌های پسماند در روتور می‌شود و مشکلی از بابت حضور تنش پسماند جوش در روتور وجود نخواهد داشت.

یکی دیگر از تعمیرات در توربین‌های بخار اصلاح tenon است. برای محکم کردن پره در شroud مورد استفاده قرار می‌گیرد و در بسیاری از مواقع به دلیل کوتاه شدن tenon در فرایند باز کردن پره‌ها، بایستی که پره‌ها را اسقاط کرد. برای کاهش هزینه‌ها با استفاده از فرایند جوشکاری ابتدا طول tenon را افزایش می‌دهند و سپس با ماشین‌کاری آن را به شکل مطلوب می‌رسانند. در شکل زیر فرایند انجام گرفته برای تعمیر tenon نمایش داده شده است. در تحقیق انجام گرفته در مرجع [۸۹] این موضوع نیز بررسی شد و مشاهده شد که در صورت انجام عملیات حرارتی مناسب، تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تعمیر، لطمه‌ای به پره‌ها نخواهد زد.



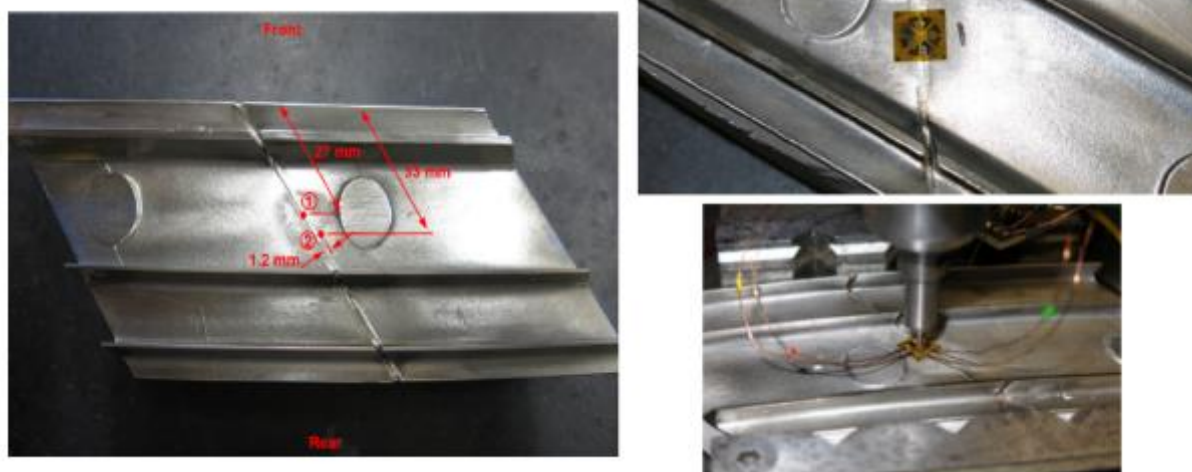
شکل ۱۵-۵: تعمیرات انجام گرفته روی tenon پره توربین بخار [۸۹]

Bonakdar و همکارانش [۹۰] در سال ۲۰۱۷ تنش‌های پسماند ناشی از جوش بخش شروید پره توربین گاز ساخته شده از Inconel-713LC را به کمک المان محدود و روش سوراخکاری مرکزی مورد بررسی قرار دادند. پارامترهایی مانند توان و سرعت جوشکاری و تأثیر آن‌ها بر میزان تنش پسماند ارزیابی شد. در شکل ۵-۱۶ هندسه بخش جوشکاری شده و همچنین گرده جوش نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۶: هندسه بخش جوشکاری شده و گرده جوش شروید پره توربین گاز [۹۰]

در شکل ۵-۱۷ نیز محل اندازه‌گیری تنش پسماند در سمت چپ و در سمت راست دو موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها نمایش داده شده است. یکی از کرنش‌سنج‌ها روی خط جوش و دیگری در فاصله ۱/۲ mm از مرکز خط جوش قرار داده شده است. مقادیر تنش پسماند به دست آمده از المان محدود و سوراخکاری مرکزی برای دو موقعیت نشان داده شده در شکل ۵-۱۷ در جدول ۵-۱ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۵-۱۷: راست: دو موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها، چپ: محل اندازه‌گیری تنش پسماند [۹۰]

جدول ۵-۱: مقادیر تنش پسماند به دست آمده از المان محدود و سوراخکاری مرکزی [۹۰]

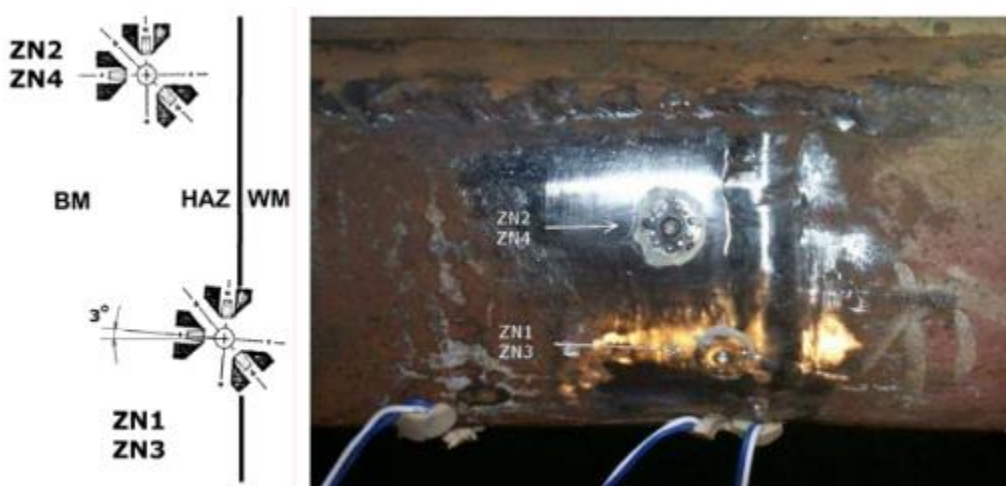
Position	FEM (MPa)	HDM (MPa)
1	780	860
2	485	520

۳-۵- تنش پسماند در بویلرها

در این بخش تحقیقات انجام گرفته در زمینه تنش‌های پسماند در بویلرها و تأثیر آن‌ها بر خرابی‌های ایجاد شده در بویلرهای نیروگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در یک نمونه بویلر نیروگاهی، در حین نصب و جوشکاری اجزای بویلر، دو عدد از لوله‌ها دچار اعوجاج شده بودند و به همین جهت بررسی‌های دقیقی برای امکان استفاده از بویلر صورت پذیرفت. برای این منظور Kurai و همکارانش تنش پسماند در ناحیه جوش را با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی اندازه‌گیری کردند [۹۱]. در شکل ۵-۱۸ محل انجام این تست نمایش داده شده است. همچنین کرنش‌سنج‌هایی در نقاط مختلف لوله‌های آسیب دیده نصب شد و در حین تست فشار، مقادیر کرنش اندازه‌گیری گردید. با مطالعات انجام گرفته مشخص گردید که مقدار تنش پسماند در حدود ۴۰٪ تنش تسلیم ماده است و همچنین در حین تست فشار، تنها کرنش‌های الاستیک در لوله‌ها ایجاد می‌شود که همگی موید امکان استفاده از تجهیز مورد نظر با شرایط فعلی می‌باشد.

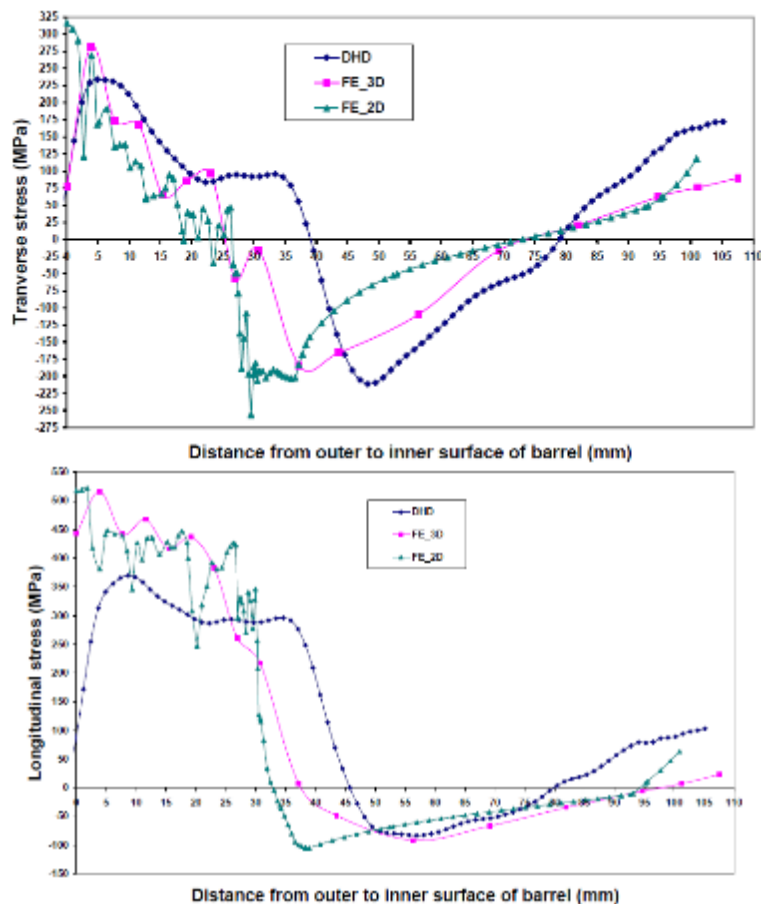
Ficquet و همکارانش [۹۲] با استفاده از روش سوراخکاری عمیق تنش‌های پسماند در نازل (بخش Steam Drum) بزرگ یک بویلر از جنس فولاد P275 را اندازه‌گیری کردند. هدف از انجام این کار و تحقیقات مشابه دیگر، صحه گذاری روش‌های المان محدود در اندازه‌گیری تنش پسماند برای قطعات بزرگ بوده است (شکل ۵-۱۹).



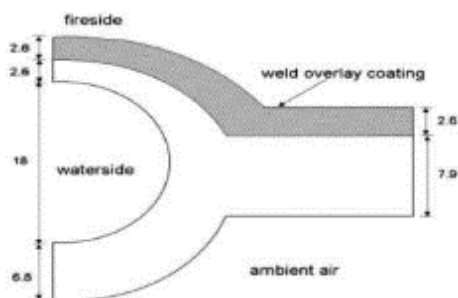
شکل ۵-۱۸: محل نصب کرنش‌سنج و اندازه‌گیری تنش پسماند [۹۱]

یکی از روش‌های محافظت از لوله‌ها در بویلرها لایه نشانی یک ماده محافظ روی لوله‌ها با استفاده از جوشکاری است که این روش را اصطلاحاً Cladding می‌نامند. در حین لایه نشانی تنش پسماند در لایه و ماده زمینه ایجاد می‌شود که مقدار آن بسیار مهم است. روش Cladding عموماً برای محافظت لوله‌ها از SCC به کار می‌رود با این حال مزیت دیگر این روش،

ایجاد تنش پسماند فشاری در ماده زمینه است. در شکل ۵-۲۰ یک نمونه از لوله‌های بویلر که لایه نشانی شده‌اند، نمایش داده شده است. در این نمونه فولاد آستنیتی 309S روی لوله‌های ساخته شده از A213 با کمک روش جوشکاری GMAW لایه نشانی شده است.

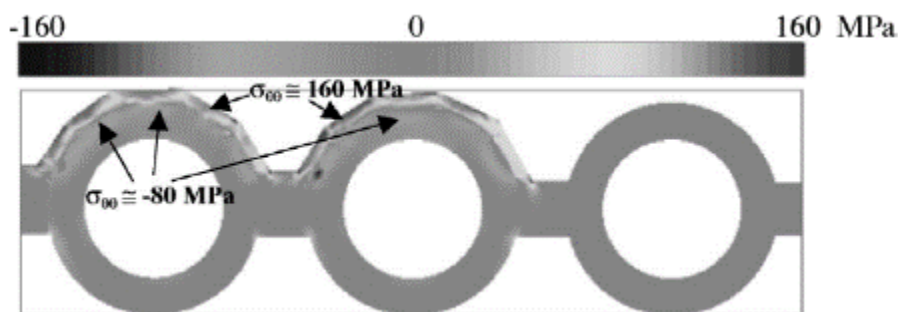


شکل ۵-۱۹: تنش‌های پسماند طولی و عرضی ایجاد شده در جوش نازل بویلر و مقایسه با نتایج عددی [۹۲]



شکل ۵-۲۰: پوشش لوله با فولاد ضد زنگ [۹۳]

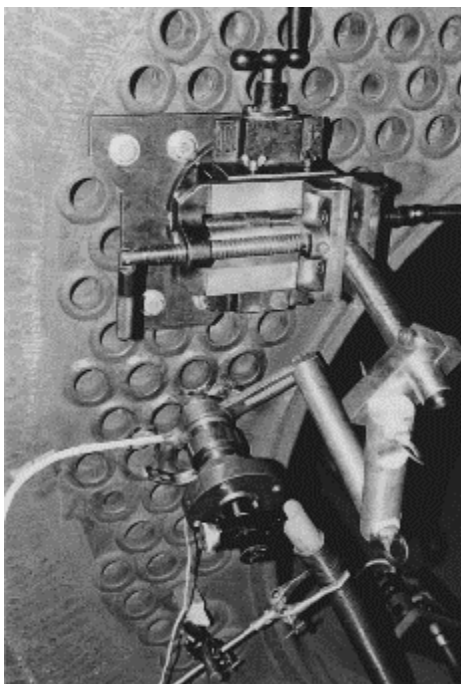
Nied و Yildirim [۹۳] با استفاده از تحلیل حرارتی-سازه‌ای، تنش‌های پسماند ایجاد شده در این فرایند را به کمک المان محدود محاسبه کردند. این تحلیل به صورت دوبعدی و با فرضیات ساده شونده زیادی انجام گرفته است. توزیع تنش پسماند ایجاد شده در لوله‌ها در شکل زیر نمایش داده شده است.



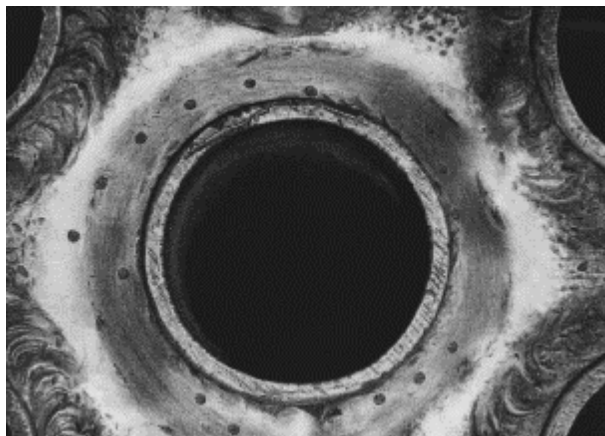
شکل ۲۱-۵: تنش پسماند ایجاد شده در لوله‌ها ناشی از cladding [93]

Citirik [۹۴] نیز ضریب شدت تنش در لوله‌های Cladding شده را محاسبه کرد. در تحلیل ایشان تنش پسماند ناشی از جوشکاری شبیه سازی نشده و تنش پسماند در اندازه تنش تسلیم در نظر گرفته شده است. در این تحقیق شبیه‌سازی حرارتی فرایند soot blowing و تنش‌های حاصل از این فرایند محاسبه شده و با تنش پسماند جوش تجمیع شده است و در نهایت مقادیر ضریب شدت تنش با در نظر گرفتن یک ترک در لوله محاسبه شده است.

در بویلرها اتصال لوله به تیوب شیت یکی از مستعدترین نقاط برای ایجاد ترک و شکست است. در این ناحیه تنش پسماند بالای جوشکاری، تمرکز تنش ناشی از هندسه اتصال و شرایط سخت محیطی سبب ایجاد شکست‌های زیادی در محل اتصال لوله به تیوب شیت می‌شود. تحقیقات زیادی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در این ناحیه انجام گرفته است. برای نمونه Tait و Press [۹۵] با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی، به اندازه‌گیری تنش پسماند در اتصال لوله به تیوب شیت در یک بویلر پرداختند. در شکل ۵-۲۲ تجهیزات استفاده شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند نمایش داده شده است.



تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی (در محل)

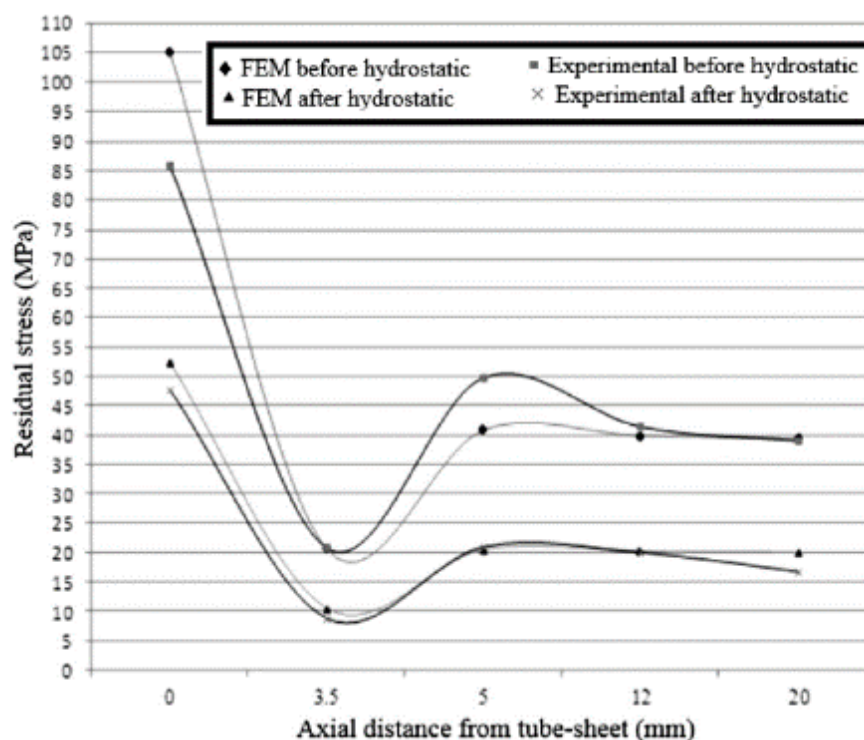


نقاط اندازه‌گیری تنش پسماند

شکل ۲۲-۵: تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی و نقاط اندازه‌گیری تنش پسماند در بویلر [۹۵]

در این تحقیق همچنین تأثیر تنش زدایی حرارتی بر میزان تنش پسماند مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور دو حالت تنش زدایی در کوره و تنش زدایی به صورت محلی با استفاده از یک لامپ تابشی با توان ۱۰۰۰ وات مورد ارزیابی قرار گرفت. با اندازه‌گیری‌های انجام گرفته مشخص شد تنش پسماند بسیار زیادی (در حدود ۵۰۰ MPa) در اثر جوشکاری لوله به تیوب شیت ایجاد می‌شود و لازم است که برای کاهش این تنش‌ها تنش زدایی انجام شود. همچنین مشخص شد که با انجام تنش زدایی در کوره، تنش پسماند به میزان ۷۵٪ کاهش می‌یابد اما با تنش زدایی به صورت محلی تنش پسماند به میزان ۳۰ الی ۴۰٪ افزایش می‌یابد که کاملاً نامطلوب است.

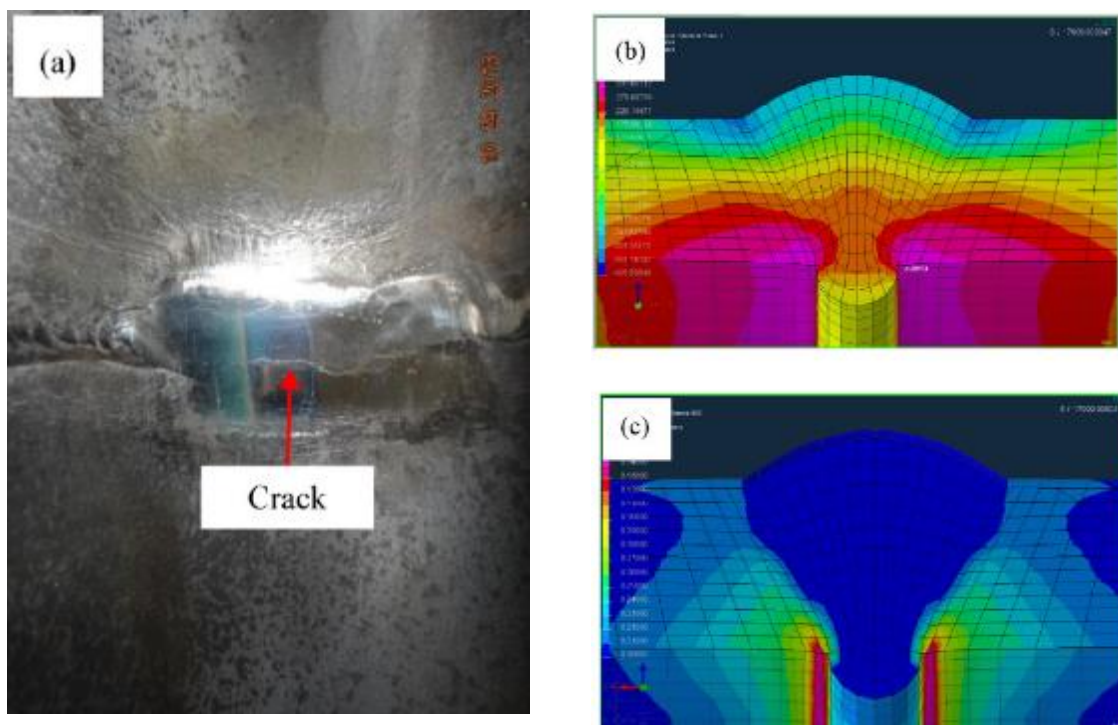
در تحقیق دیگری که در توسط Danyali و Ranjbarnodeh [۹۶] انجام گرفت، تأثیر فشار هیدرواستاتیکی بر تنش پسماند اتصال جوش لوله به تیوب شیت مطالعه شد. برای این منظور از روش سوراخکاری مرکزی و المان محدود دو بعدی برای بررسی تأثیر فشار هیدرواستاتیک استفاده شد و مشخص گردید که با اعمال فشار هیدرواستاتیک می‌توان تا ۵۸٪ تنش پسماند محوری را کاهش داد. در شکل ۵-۲۳ تأثیر فشار هیدرواستاتیکی بر تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی و المان محدود نمایش داده شده است.



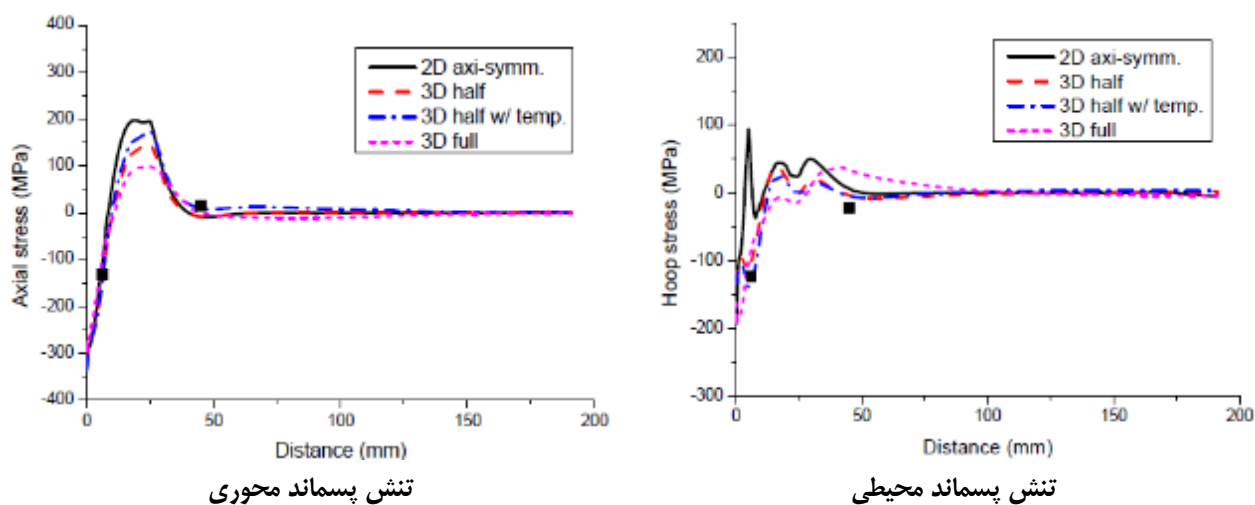
شکل ۲۳-۵: تأثیر فشار هیدرواستاتیکی بر تنش پسماند اتصال جوش لوله به تیوب شیت [۹۶]

Lee و همکارانش [۹۷] نیز به بررسی ترک ایجاد شده در جوش لوله بویلر که از ماده 347H ساخته شده است پرداخته و دلایل ایجاد ترک پس از تنها ۳۶۰۰ ساعت کارکرد بویلر را ارزیابی کردند. برای این منظور علاوه بر تصاویر میکروسکوپی از ناحیه HAZ جوش مذکور، با استفاده از تحلیل المان محدود میزان تنش پسماند ایجاد شده در اثر جوشکاری را نیز محاسبه نمودند. تنش پسماند کششی بسیار بالا، رسوب کاربید کروم و حجم بالای مارتنزیت در ناحیه HAZ از دلایل ایجاد ترک در جوش ذکر گردید. ترک ایجاد شده و همچنین تنش پسماند و کرنش پلاستیک شبیه سازی شده در شکل زیر نمایش داده شده است.

Kim و همکارانش [۹۸] نیز برای همین ماده و برای هندسه مشابه با استفاده از شبیه سازی المان محدود مقادیر تنش پسماند را محاسبه کردند. در این تحقیق از روش XRD برای اندازه گیری تنش پسماند در نزدیکی خط جوش استفاده شد. تحلیل المان محدود به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام گرفت. در شکل زیر مقادیر تنش پسماند به صورت عددی و تجربی (نقاط) نمایش داده شده است.



شکل ۲۴-۵: (a) ترک ایجاد شده، (b) تنش پسماند و (c) کرنش پلاستیک ایجاد شده پس از جوشکاری [۹۷]



تنش پسماند محوری

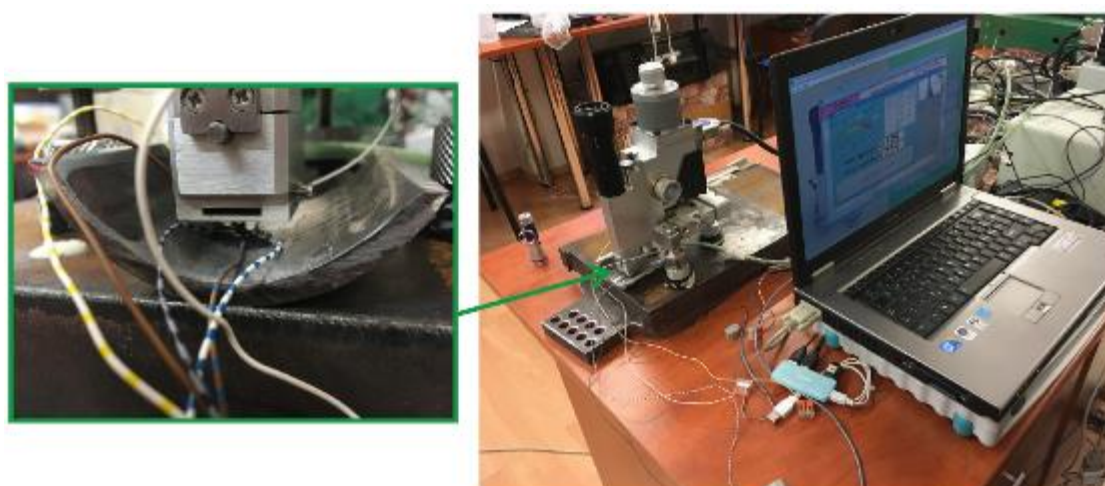
تنش پسماند محیطی

شکل ۲۵-۵: مقادیر تنش پسماند محیطی و محوری جوش لوله بویلر [۹۸]

در یک بویلر بخار پس از چهار سال فعالیت، آسیب‌های و ترک‌های زیادی در لوله‌های بویلر ایجاد شد. به همین جهت Pastor و همکارانش [۹۹] به بررسی ترک‌های ایجاد شده در اتصالات جوشی پرداختند. برای این منظور نمونه‌های کشش و نمونه‌های مورد نیاز برای ارزیابی سختی و همچنین تصاویر میکروسکوپی از لوله آسیب دیده تهیه گردید. همچنین با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی، مقادیر تنش پسماند در لوله محاسبه شدند و با استفاده از المان محدود، محلی که بیشترین تنش در آن ایجاد می‌شود را نیز تعیین نمودند. با اندازه‌گیری تنش پسماند مشخص گردید که تنش پسماند در لوله در حدود 300 MPa است که بسیار بالا می‌باشد. با این حال از آن جایی که این بویلر برای ۴ سال بدون نقص کار کرده است، احتمال می‌رود که دلیل خرابی گسترده در بویلر، اشکال ایجاد شده در سیستم کنترل و در نتیجه شوک حرارتی ایجاد شده در بویلر است که تنش حرارتی ناشی از آن با تنش پسماند جمع شده و سبب آسیب گسترده در بویلر شده است.



شکل ۲۶-۵: راست: آسیب ایجاد شده در لوله بویلر، سمت چپ: نمونه های بریده شده از لوله آسیب دیده [۹۹]



شکل ۲۷-۵: تجهیزات سوراخکاری مرکزی برای اندازه گیری تنش پسماند در لوله آسیب دیده بویلر [۹۹]

۵-۴- آسایش تنش پس از اعمال تنش پسماند فشاری

یک لایه از تنش پسماند فشاری به شکل قابل توجهی سبب بهبود عمر خستگی می شود. با وجود این تنش فشاری، جوانه زنی ترک در خستگی پر چرخه به تاخیر می افتد. در صورتی که تنش فشاری تا عمق مشخصی از سطح جسم، نفوذ کند در آن صورت حتی در خستگی کم چرخه نیز رشد ترک به تعویق می افتد.

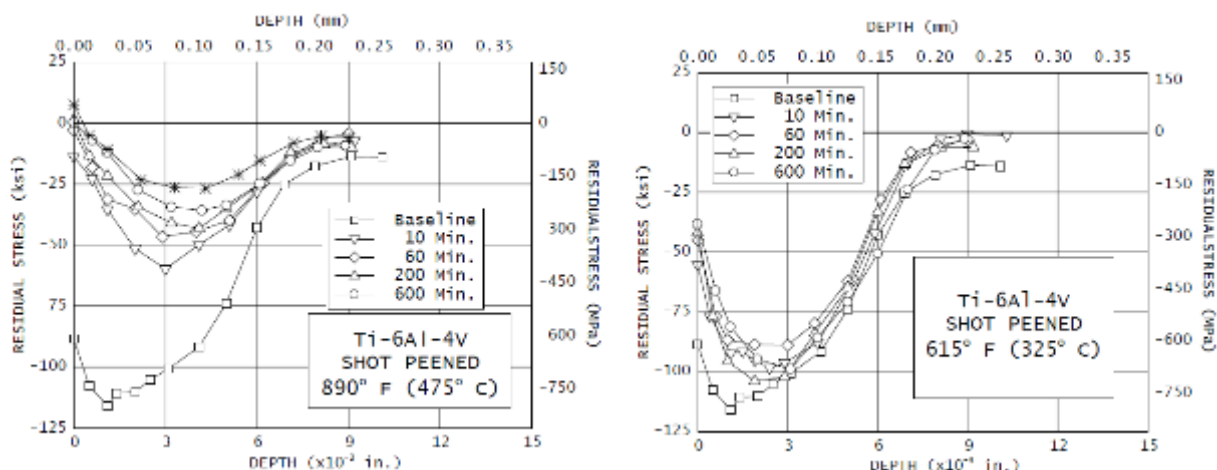
در اثر ایجاد، بازتوزیع و رهایش تنش پسماند در یک سازه، احتمال ایجاد اعوجاج وجود دارد. اگر تنشهای پسماند فشاری که با استفاده از عملیات سطحی در سازه ایجاد شده اند، رهایش یابند در آن صورت دیگر شاهد بهبود عمر خستگی در آن سازه نخواهیم بود. و در صورتی که ضخامت قطعه کم باشد، امکان دارد اعوجاج ایجاد شده عملکرد آن قطعه را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد. برای نمونه اعوجاج یک پره، سبب تغییر ایرفویل آن و در نتیجه تغییر عملکرد آن می شود. به همین جهت عدم رهایش کامل تنش پس از اعمال تنش پسماند فشاری بسیار حائز اهمیت است.

سه مکانیزم اصلی برای آسایش تنش عبارتند از: (۱) اضافه بار^{۲۰} کششی یا فشاری بیش از حد (۲) بارگذاری چرخه ای (نزدیک یا بالاتر از حد دوام) و (۳) رهایش حرارتی [۱۰۰]

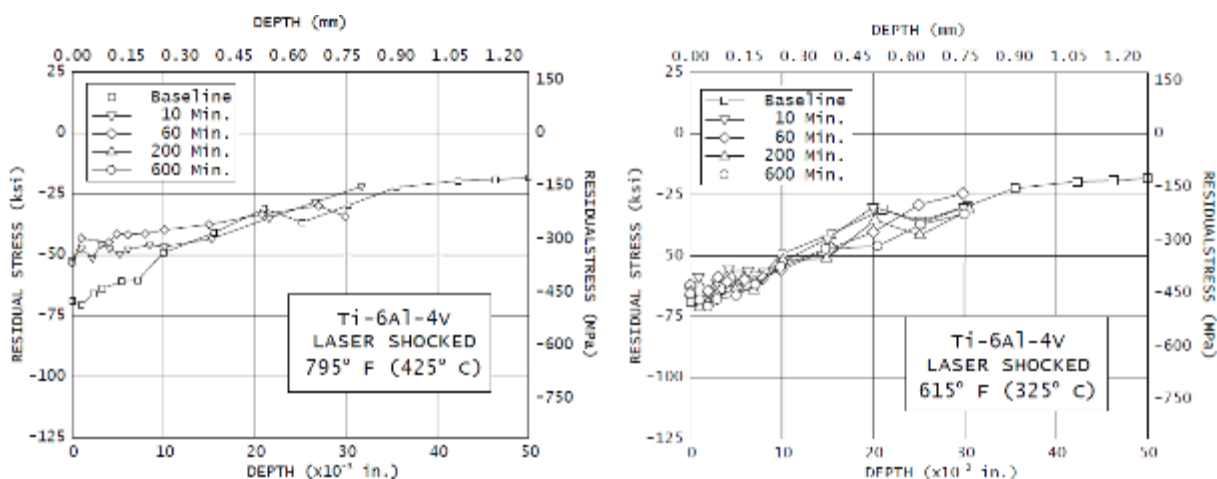
²⁰ Overload

در اجزای توربین گاز، توربین بخار و بویلرها از آنجایی که سطح تنش بسیار پایین تر از حد دوام خستگی است در غیاب بارهای ضربه‌ای، رهایش حرارتی تنها مکانیزم آسایش تنش در اجزای توربین است. رهایش حرارتی تنش پسماند فشاری که در اثر ساچمه زنی در سطح توربین ایجاد شده است در مقالات مختلف گزارش شده است. در ادامه تحقیق انجام گرفته Prevéry و همکارانش [۱۰۰] که در ارتباط با اثر کارسختی بر میزان آسایش تنش پس از اعمال تنش پسماند فشاری است مورد بررسی قرار می‌گیرد.

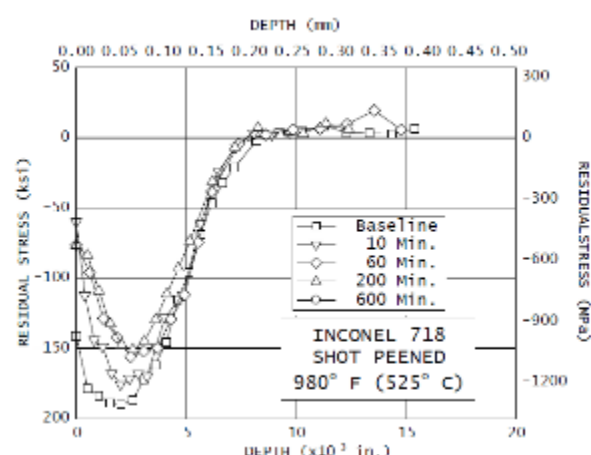
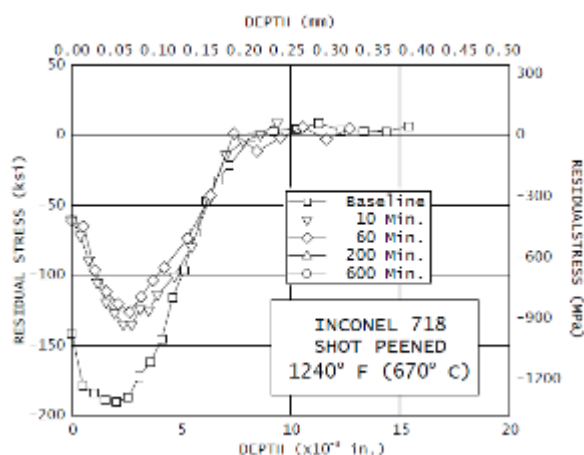
اندازه و نرخ آسایش تنش پسماند با میزان کار سختی انجام شده روی ماده افزایش می‌یابد. افزایش چگالی نابجایی و انرژی داخلی سبب سریعتر آزاد شدن تنش پسماند فشاری در یک دمای مشخص می‌شود. در روش‌های تولید تنش پسماند فشاری که در آن‌ها میزان کمی کارسختی در آلیاژهای تیتانیوم و نیکل ایجاد می‌شود آسایش تنش کمتری مشاهده می‌شود. در روش لیزر پینینگ که کمترین کارسختی را ایجاد می‌کند، بالاترین مقاومت به آسایش حرارتی تنش وجود دارد. برای نمونه در Ti-8-1-1 پس از ۴ ساعت قرارگیری در معرض دمای ۲۳۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد، تقریباً هیچ آسایش تنشی مشاهده نشده است.



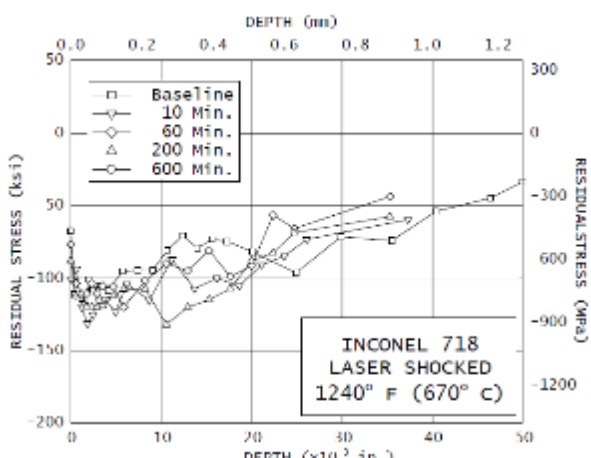
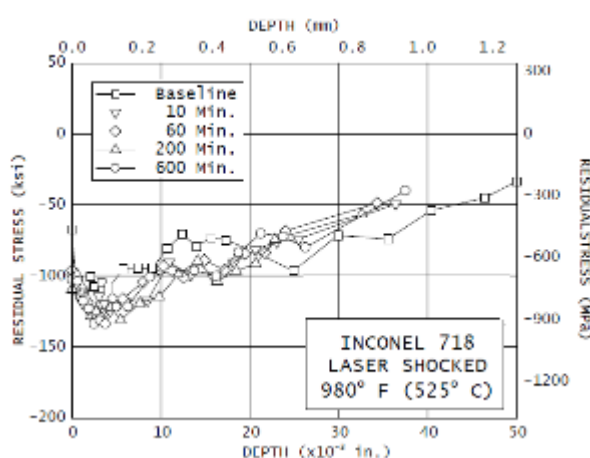
شکل ۲۸-۵: تأثیر دمای ۳۲۵ و ۴۷۵ درجه سانتیگراد بر آسایش تنش آلیاژ Ti-6Al-4V بعد از ساچمه زنی [۱۰۰]



شکل ۲۹-۵: تأثیر دمای ۳۲۵ و ۴۷۵ درجه سانتیگراد بر آسایش تنش آلیاژ Ti-6Al-4V بعد از لیزر پینینگ [۱۰۰]



شکل ۳۰-۵: تأثیر دمای ۵۲۵ و ۶۷۰ درجه سانتیگراد بر آسایش تنش آلیاژ INCONEL 718 بعد از ساچمه زنی [۱۰۰]



شکل ۳۱-۵: تأثیر دمای ۵۲۵ و ۶۷۰ درجه سانتیگراد بر آسایش تنش آلیاژ INCONEL 718 بعد از لیزر پینینگ [۱۰۰]

با توجه به شکل‌های بالا، آسایش حرارتی تنش بسیار زیاد بوده و حتی در مدت زمان ۱۰ دقیقه و در دمای نسبتاً پایین توربین، در حدود ۵۰٪ از تنش پسماند در آلیاژهای تیتانیوم و پایه نیکل آزاد می‌شود. نرخ و میزان آسایش تنش کاملاً متناسب با میزان کارسختی ایجاد شده در نمونه‌ها است و هر چه میزان کارسختی بیشتر باشد آسایش تنش بیشتری اتفاق می‌افتد.

**۶- فصل ششم: روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند قابل توسعه
در پژوهشگاه نیرو**

۱-۶- مقدمه

در این فصل به بررسی جامع چند روش اندازه‌گیری تنش پسماند که امکان اعمال آن‌ها در کشور و در پژوهشگاه نیرو وجود دارد، پرداخته می‌شود. این روش‌ها عبارتند از روش کانتور، روش سوراخکاری مرکزی و روش میدان مغناطیسی. سعی شده است که تمام جوانب اجرای این چند روش توضیح داده شود و مرور ادبیات دقیقی برای این روش‌ها انجام پذیرد.

۲-۶- روش کانتور

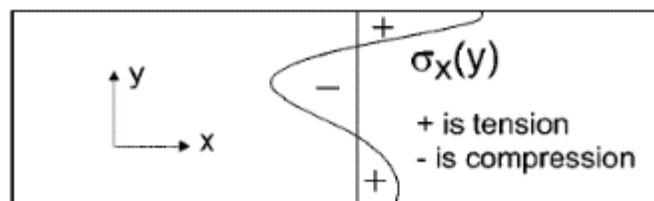
این روش یکی از جدیدترین روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند است که در سال ۲۰۰۰ توسط Prime [۱۱] معرفی شد. اساس این روش بر آزادسازی تنش پسماند در اثر برش است. در این روش یک برش کامل در نمونه زده می‌شود و تحت اثر این برش، تنش‌های پسماند در مقطع برش، آزاد شده و سبب اعوجاج در سطح برش می‌شوند. با اندازه‌گیری مقدار دقیق این اعوجاج‌ها و اعمال آن‌ها به یک مدل المان محدود، مقدار دقیق تنش پسماند در نمونه محاسبه می‌شود. ویژگی اصلی این روش محاسبه تنش پسماند در سطح وسیعی از مقطع برش خورده است و برای تمام سطح برش خورده، تنش پسماند به دست می‌آید. البته در این روش تنها تنش نرمال عمود بر سطح برش خورده قابل محاسبه است. از این جهت هیچ روش دیگری قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در این سطح وسیع را ندارد. اما باید خاطر نشان کرد که این روش، یک روش کاملاً مخرب است و قابلیت اعمال در یک قطعه در حال کار را ندارد. مراحل انجام این روش در شکل زیر توضیح داده شده است. در حالت کلی این روش از سه بخش تشکیل شده است که عبارتند از :

۱- برش نمونه

۲- اندازه‌گیری اعوجاج سطوح برش

۳- محاسبه تنش پسماند با استفاده از المان محدود

در ادامه این مراحل به طور کامل تشریح می‌شوند.



A Original residual stress distribution.

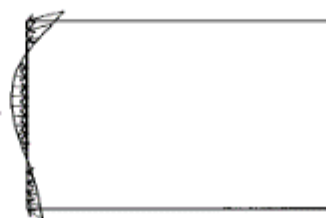
= B

Part cut in half,
stresses relieved
on face of cut.



+ C

Force cut surface
back to original state.
All stresses back to
original values (A).



شکل ۱-۶: مراحل انجام روش کانتور [۱۱]

۱-۲-۶- برش نمونه

بایستی نمونه به صورتی بریده شود که شرایط زیر را ایجاد کند

۱- دقیقاً طبق پروفایل داده شده برش را ایجاد کند.

۲- برش عرض صفر داشته باشد.

۳- تنش پسماند اضافی در نمونه ایجاد نکند.

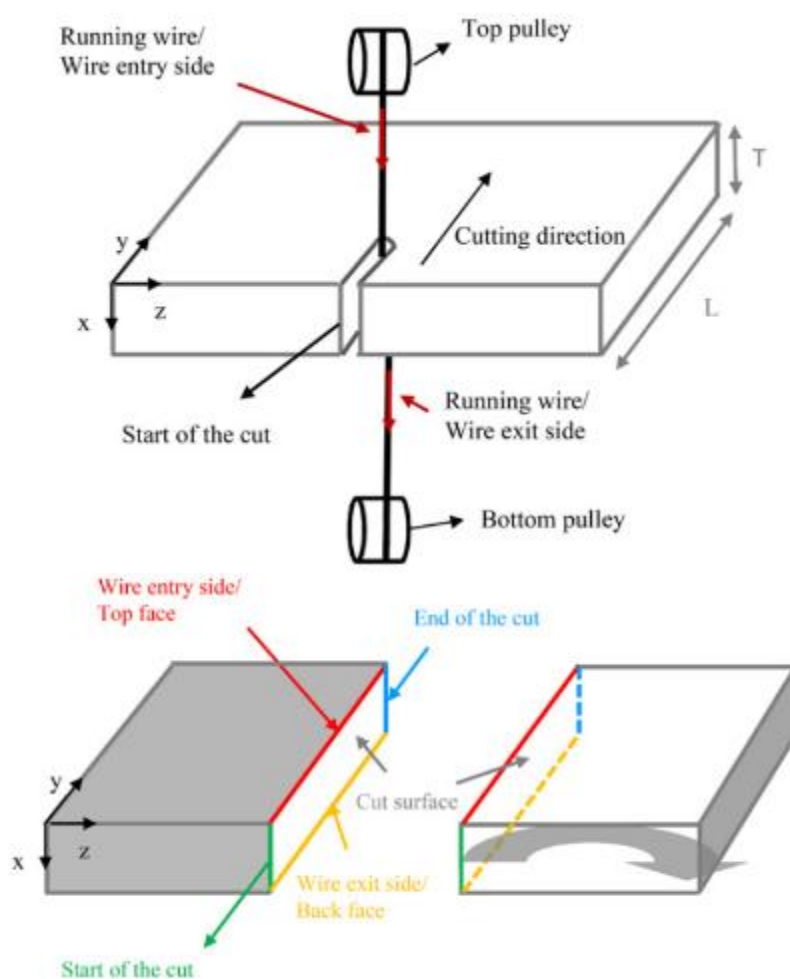
۴- تغییر شکل پلاستیک ایجاد نکند.

اکثر روش‌های مرسوم ایجاد برش در فلزات، بر مبنای تغییر شکل پلاستیک ناشی از نیروی تماسی زیاد و حرارت ایجاد شده در ناحیه برش هستند که هر دو عامل سبب تغییر در الگوی تنش پسماند می‌شوند. به همین جهت نمی‌توان از آنها در روش کانتور بهره برد. در روش کانتور تنها می‌توان از روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی یا EDM²¹ استفاده کرد. این روش برش به صورت غیر تماسی بوده و به دلیل قرار داشتن نمونه در آب یونیزه شده (یا روغن)، انتقال حرارت بین پلاسما و قطعه کار بسیار ناچیز است. در ماشین کاری WEDM²² که در روش کانتور استفاده می‌شود، یک جریان الکتریکی از سیم متحرک بسیار نازک عبور می‌کند و با جرقه ایجاد شده بین سیم و قطعه کار، ناحیه برش وارد فاز پلاسما شده و بخشی از ماده برداشته می‌شود. این روش

²¹ Electrical Discharge Machining

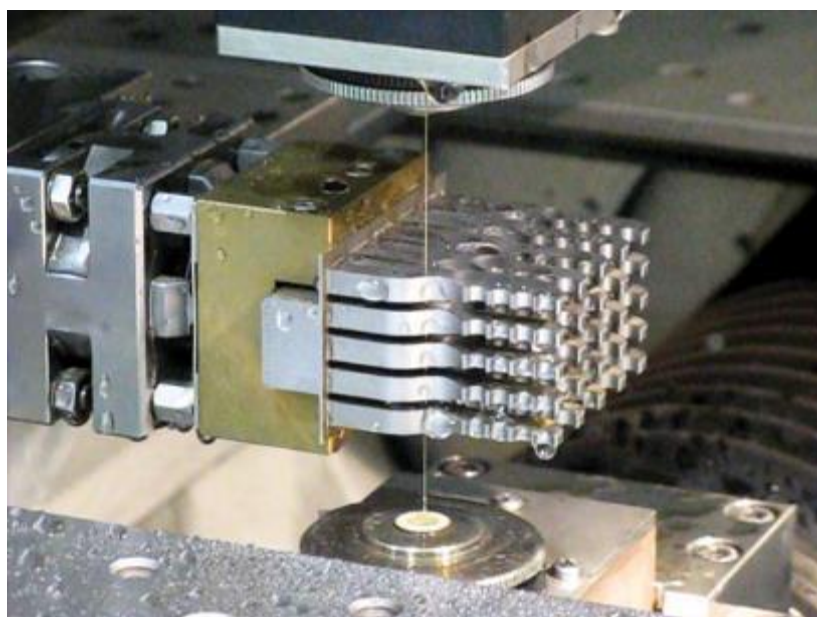
²² Wire Electrical Discharge Machining

در ایران با نام وایرکات شناخته می‌شود. در این روش ضخامت برش تقریباً صفر بوده و تنها یک لایه بسیار نازک از جسم برداشته می‌شود. همچنین با توجه به اینکه تماس فیزیکی وجود نداشته و حرارتی نیز به جسم منتقل نمی‌گردد، هیچ تنش پسماند جدیدی ایجاد نشده و تنش پسماندهای قبلی نیز باز توزیع نخواهند شد. شماتیک از روش WEDM در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. در این روش لازم است که سیال یونیزه شده به صورت پیوسته در محل برش جریان داشته باشد. در شکل ۳-۶ نیز یک نمونه از ایجاد برش توسط روش WEDM به نمایش درآمده است. بایستی مراقبت‌های لازم در رابطه با پاره نشدن سیم و عدم ارتعاش سیم صورت پذیرد زیرا در غیر این صورت در حین برش، روی سطح زبری ایجاد می‌شود. فاصله سیم و بدنه باید به اندازه‌ای باشد که اولاً اتصال کوتاه اتفاق نیفتد و ثانیاً ارتعاش سیم روی برش اثر منفی نگذارد.



شکل ۲-۶: شماتیک روش ماشین کاری WEDM [۱۰۱]

سیم WEDM با قطر ۲۰ الی ۳۵۰ میکرومتر در بازار موجود است [۱۰۱]. انتخاب قطر سیم مناسب بستگی به ضخامت نمونه دارد. هر چقدر قطر سیم کمتر باشد برآمدگی لبه برش کمتر می‌شود اما احتمال پارگی سیم نیز در این حالت زیاد است و زمان برش نیز بسیار بیشتر خواهد شد. در جدول ۶-۱ یک راهنمای کلی برای انتخاب قطر سیم برش ارائه شده است. البته حد پایین قطر سیم بستگی به جنس نمونه دارد.



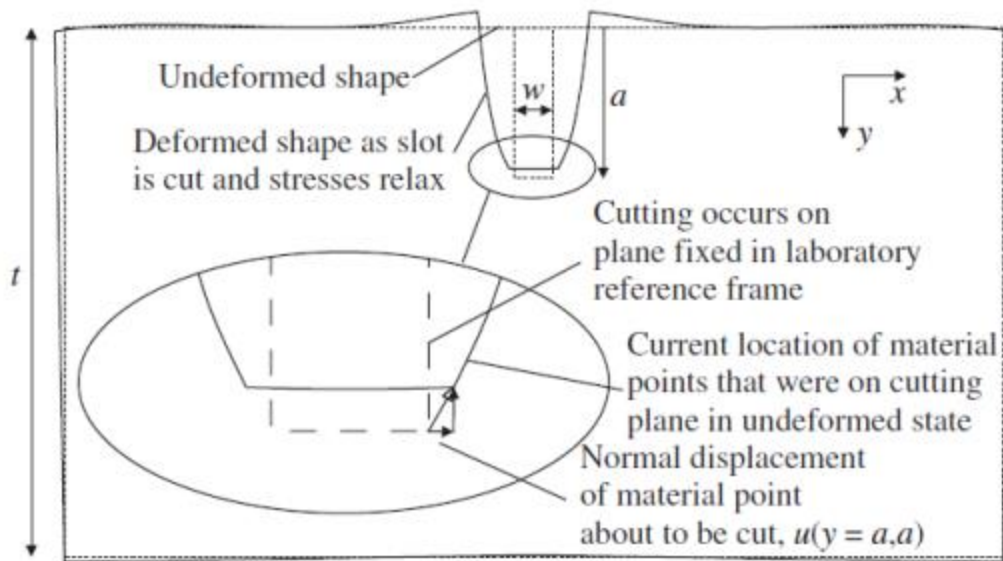
شکل ۳-۶: ماشینکاری با روش WEDM

جدول ۱-۶: قطر سیم پیشنهادی برای روش WEDM [۱]

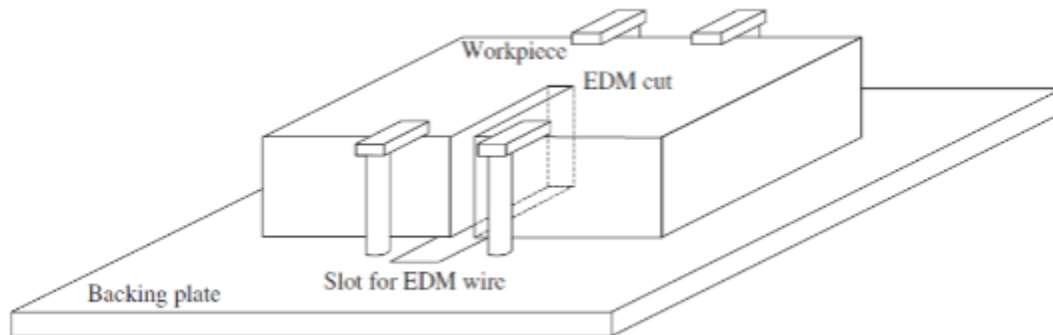
Specimen thickness	EDM wire diameter
< 15 mm	100 μ m
10 mm – 100 mm	150 – 200 μ m
> 50 mm	250 μ m

بهترین نتایج با استفاده از سیم‌های برنجی حاصل می‌گردد. البته تا کنون یک بررسی جامع برای تاثیر انواع مختلف سیم‌ها انجام پذیرفته اما مشخص شده است که سیم‌های تنگستنی یا سیم برنجی پوشش داده شده با روی نتایج با دقت پایین‌تری را ارائه می‌دهند [۱].

برش نمونه باید به گونه‌ای باشد که عرض برش در طول فرایند ثابت باشد. به عبارتی دیگر اگر دو قطعه بریده شده در کنار یکدیگر قرار گیرند، هیچ فاصله‌ای بین آنها وجود نداشته باشد و هیچ برآمدگی در لبه‌ها مشاهده نشود. یکی از خطاهایی که در هنگام برش با WEDM ممکن است اتفاق بیفتد، برآمدگی لبه برش یا bulge error است. این مشکل ممکن است در نمونه‌هایی که عاری از تنش پسماند هستند نیز بوجود آید. این خطا به صورت متقارن خواهد بود و در شکل زیر به صورت شماتیک نمایش داده شده است. جهت حداقل کردن این خطا، بایستی که نمونه‌ها کاملاً فیکس شوند. باید خاطر نشان کرد که با افزایش عرض نمونه، این خطا افزایش می‌یابد. یک مثال از فیکس کردن قطعه کار در حین WEDM در شکل ۶-۵ آورده شده است. برای این منظور هر دو سمت نمونه با استفاده از گیره به میز کار محکم شده‌اند.



شکل ۴-۶: برآمدگی ایجاد شده (bulge error) طی فرایند WEDM [۱]



شکل ۵-۶: طریقه فیکس کردن نمونه طی فرایند WEDM [۱]

۲-۲-۶- اندازه گیری سطح نمونه

پس از ایجاد برش در نمونه حاوی تنش پسماند، تحت اثر برش ایجاد شده تنش‌های پسماند آزاد شده و سطح دچار اعوجاج می‌شود. مرحله دوم در انجام روش کانتور اندازه‌گیری اعوجاج ایجاد شده در سطح برش است. دامنه اعوجاج ایجاد شده در بازه $100-10\text{ }\mu\text{m}$ است [۱] و در نتیجه بایستی با دقت بسیار بالایی این اندازه‌گیری صورت پذیرد. برای این منظور دو روش مختلف CMM^{23} و لیزر برای اندازه‌گیری اعوجاج به کار گرفته می‌شوند.

پس از انجام برش باستی سطوح برش، با دقت تمیز شوند. برای این منظور بهتر است که از حمام آلتراسونیک استفاده شود [۱۰۱]. هر دو سطح برش بایستی اندازه‌گیری شوند. بهتر است که نقاط اندازه‌گیری برای هر دو سطح یکسان باشد و یکبار با یک شبکه درشت اندازه‌گیری صورت پذیرد و سپس برای تعداد نقاط بیشتر اینکار تکرار شود. با اینکار در مرحله اول یک پروفیل کلی از اعوجاج سطح به دست می‌آید و همچنین تقریب خوبی از زمان مورد نیاز برای انجام CMM حاصل می‌گردد. شعاع گوی پراب CMM در صورتی که 2 mm باشد، نتایج دقت خوبی خواهند داشت و بدین وسیله زبری سطح در نتایج وارد نخواهد شد.

²³ coordinate measuring machine

با توجه به اینکه در هر ثانیه تقریباً یک نقطه ثبت می‌شود این مرحله ممکن است که چندین ساعت طول بکشد. با توجه به اینکه پایداری حرارتی بسیار مهم بوده و می‌تواند تاثیر مهمی بر نتایج بگذارد لازم است که در طول این مدت، دمای محیط تغییر نکرده و ابعاد شبکه به اندازه‌ای باشد که زمان ثبت داده‌ها بسیار طولانی نشود. لازم به ذکر آن چیزی که در CMM اهمیت دارد دقت دستگاه است که برای روش کانتور باید در حدود $0.5 \pm \mu\text{m}$ باشد [۱۰۱].

روش‌های غیر تماسی که همگی با لیزر هستند، سرعت اندازه‌گیری بالاتری داشته و توانایی ثبت هزاران داده در ثانیه را دارند. اما در تمام این روش‌ها زبری سطح نیز اندازه‌گیری می‌شود و به همین جهت لازم است که مقادیر به دست آمده فیلتر شوند و زبری سطح از آنها حذف گردد. البته باید خاطر نشان کرد که در این روش امکان اندازه‌گیری سطح حتی در نزدیکی لبه‌ها نیز وجود دارد. امری که در CMM خطای زیادی ایجاد می‌کند [۱۰۱]. در شکل ۶-۶ دو دستگاه CMM تماسی و CMM لیزری نمایش داده شده است.

۳-۲-۶- آنالیز داده‌ها

سومین مرحله در اندازه‌گیری تنش پسماند با روش کانتور، آنالیز داده‌ها و محاسبه تنش پسماند با استفاده از المان محدود است. Prime در مرجع [۱۱] که در آن روش کانتور را توصیف کرده است، بیان می‌کند که در المان محدود نیاز نیست که سطح تغییر شکل یافته مورد بررسی قرار گیرد. در صورتی که یک سطح صاف مدل شود و تغییر شکل‌ها به آن‌ها اعمال شود، دقت بسیار کافی دارد و به دلیل کوچک بودن تغییر شکل‌ها، مدل کردن نمونه با تغییر شکل‌ها تاثیر خاصی روی افزایش دقت محاسبه تنش پسماند ندارد.

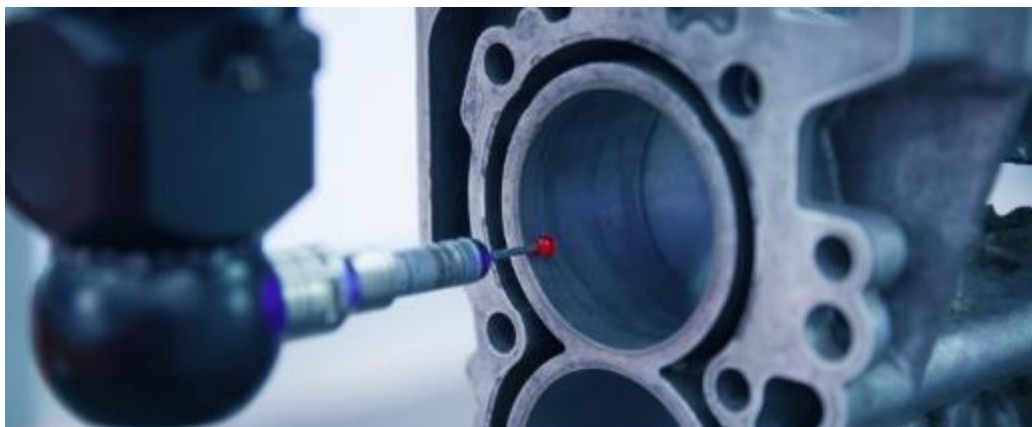
در صورتی که فرض کنیم در حالت دو بعدی یک نمونه عمود بر جهت فرضی x بریده شود، تنش‌های σ_{xx} و τ_{xy} در سطح برش آزاد می‌شوند. با توجه به اینکه اندازه‌گیری اعوجاج تنها در جهت عمود بر سطح امکان پذیر است به همین جهت تنها می‌توان σ_{xx} را محاسبه نمود. برای حذف اثر تنش برشی، بایستی مقادیر اعوجاج در دو سمت نمونه را با یکدیگر جمع کرده و میانگین گرفت.

با توجه به شکل ۶-۷ در سطح برش دو نیروی سطح خواهیم داشت که عبارتند از

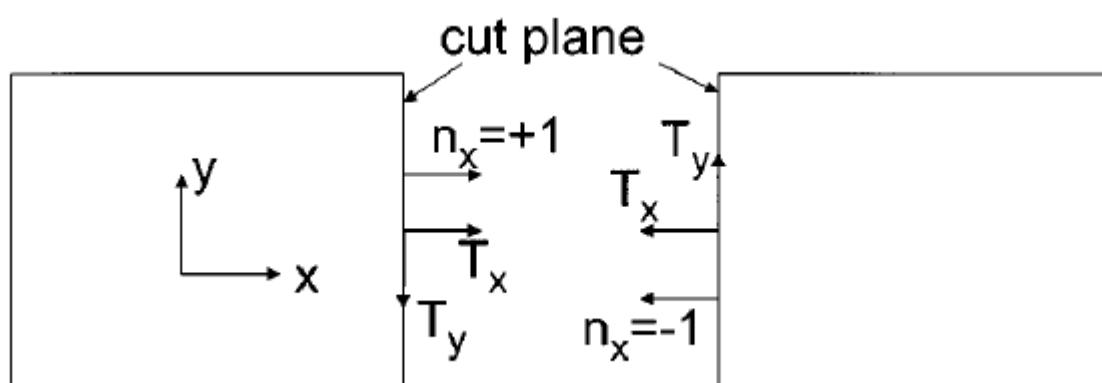
$$T_x = -\sigma_x n_x \quad (۶-۱)$$

$$T_y = -\tau_{xy} n_x \quad (۶-۲)$$

نیروی T_x در هر دو سمت نمونه برش خورده، عمود بر جهت برش است، اما نیروی T_y در یکی از نمونه‌ها به سمت بالا و در دیگری به سمت پایین است. به همین جهت در صورتی که مقادیر جابجایی سطح، میانگین‌گیری شوند، عملاً اثر T_y حذف می‌شود. به بیانی دیگر با میانگین‌گیری اثر تنش برشی حذف شده و تنها چیزی که باقی می‌ماند تنش نرمال عمود بر سطح است. در صورتی که نمونه به صورت سه بعدی بود، همین مباحث برای τ_{xz} نیز صادق خواهد بود. در نتیجه کافی است که یک سمت از نمونه بریده شده در نرم افزار المان محدود و به صورت صفحه برش صاف، مدلسازی شود و معکوس اعوجاج به دست آمده با CMM به آن اعمال شود.

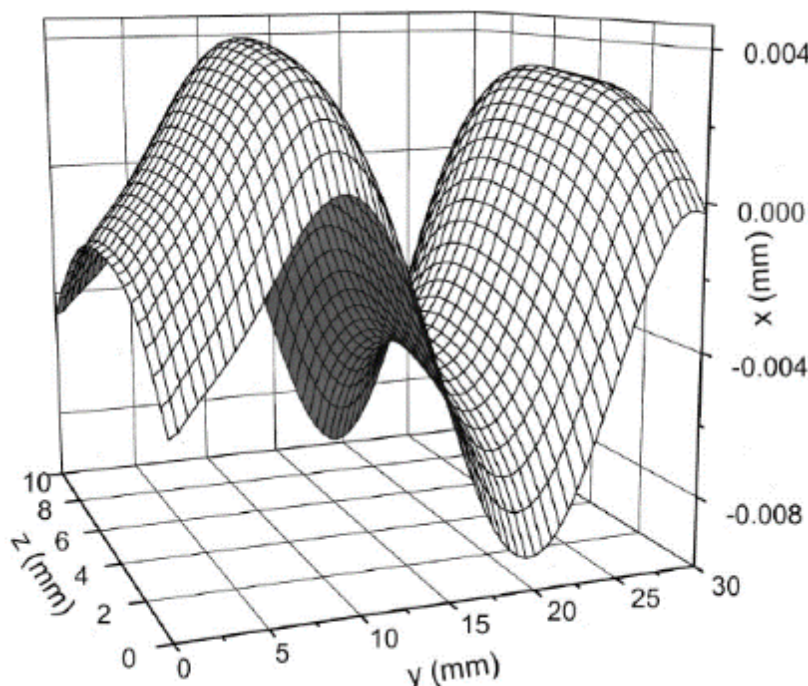


شکل ۶-۶: بالا: دستگاه تماسی و پایین: دستگاه CMM لیزری



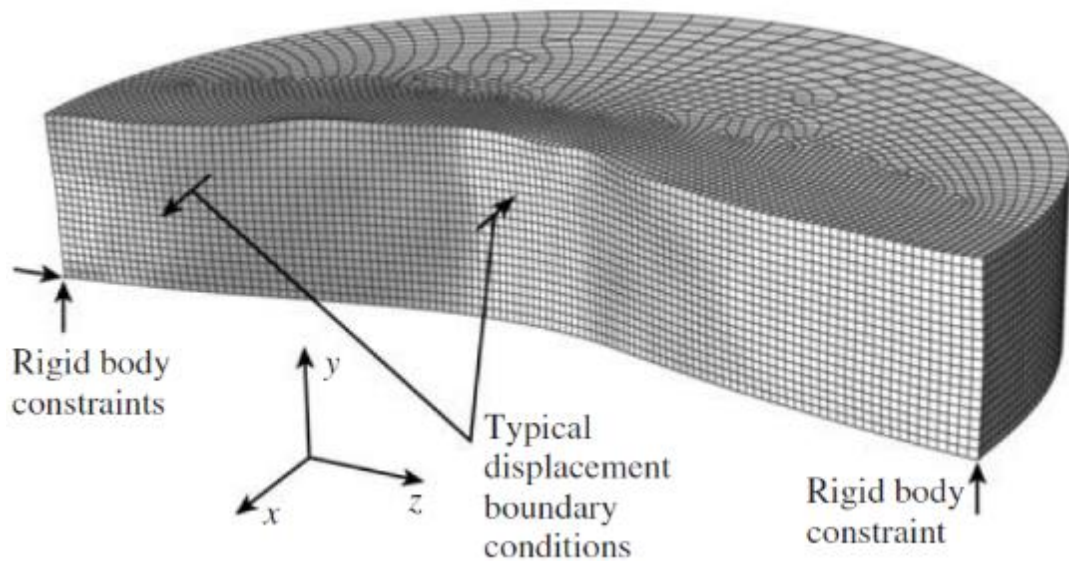
شکل ۶-۷: عکس العمل‌های سطح در ناحیه برش خورده [۱۱]

با توجه به تعداد بسیار زیاد نقاط اندازه‌گیری شده توسط CMM و همچنین به سبب وجود نویزهای ناشی از زبری و تلرانس دستگاه CMM بهتر است که داده‌های به دست آمده پالایش شوند. برای این منظور می‌توان با استفاده از سری‌های فوریه، یک رویه از داده‌ها گذارند. ابزارهای متنوعی برای این منظور در نرم افزار MATLAB گنجانده شده است. در شکل زیر یک نمونه از این رویه‌ها نمایش داده شده است. برای ترسیم این رویه از روش bivariate Fourier series استفاده شده است. این رویه از ۱۵۰۰۰ داده خام منتهی از CMM به دست آمده است.



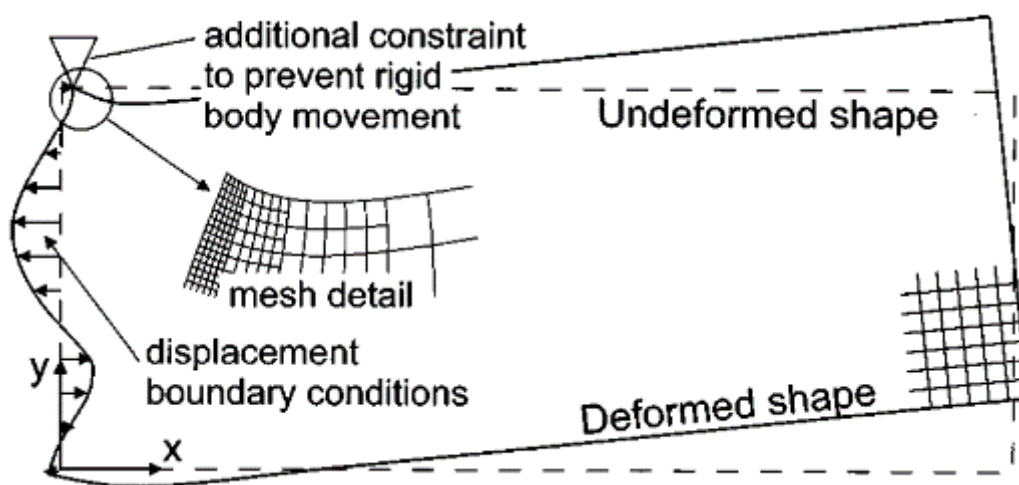
شکل ۸-۶: رویه عبور داده شده از داده‌های خام CMM [۱۱]

لازم است که در سطح برش از المان با سایز کوچک استفاده کرد و تا حد ممکن ابعاد المان‌ها در نزدیکی ابعاد شبکه اندازه‌گیری نقاط با CMM باشد. برای نمونه اگر سطح برش با ۵۰۰۰۰ نقطه اندازه‌گیری شده است، بهتر است که این سطح حاوی ۵۰۰۰۰ گره باشد. البته نیازی نیست که در کل نمونه المان‌ها ریز باشند و با دور شدن از سطح برش، بهتر است که ابعاد المان‌ها درشت‌تر شوند. در مدل المان محدود لازم است که با اعمال شرایط مرزی، از حرکت صلب گونه و دوران نمونه جلوگیری کرد. لازم است که کمترین قیود ممکن روی نمونه اعمال شود تا اثری بر بازتوزیع تنش پسماند نداشته باشد. در شکل ۶-۹، برای نمونه قیود اعمال شده به نمونه بریده شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل زیر، نمونه تغییر شکل یافته پس از اعمال تغییر شکل‌های به دست آمده از CMM، نمایش داده شده است.



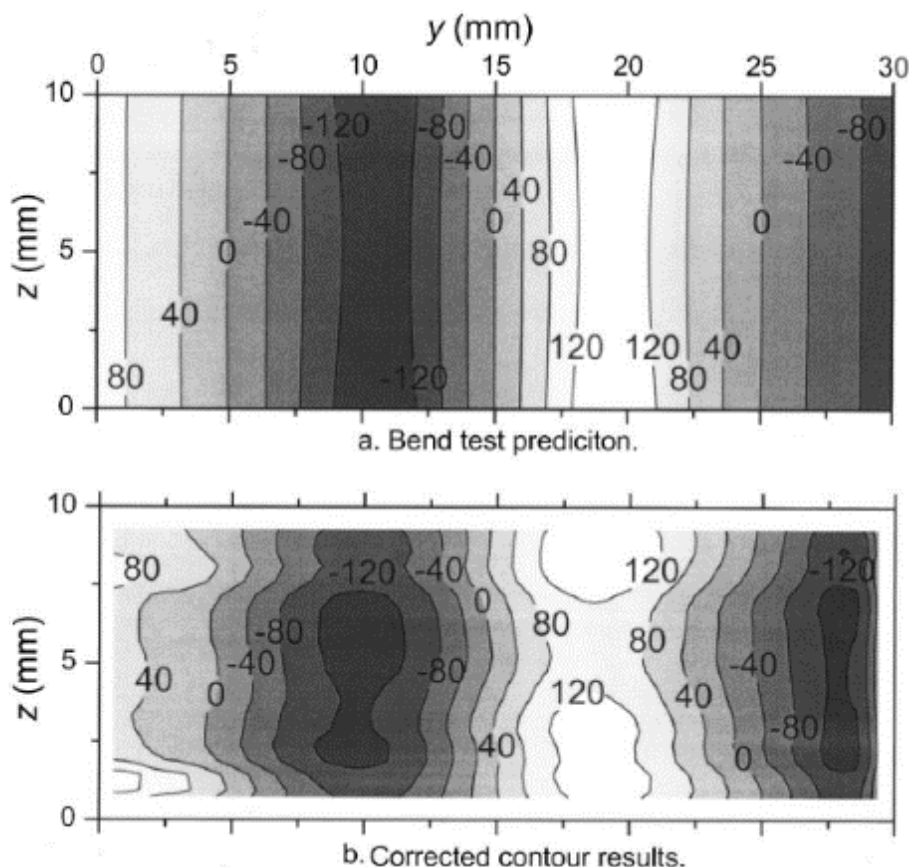
شکل ۹-۶: المان بندی و شرایط مرزی اعمالی به مدل المان محدود در روش کانتور [۱]

در شکل ۶-۱۰ نمونه اغراق شده از مدل المان محدود نمایش داده شده است. در این مدل دوبعدی تنها یک نقطه از نمونه فیکس شده است تا از حرکت صلب گونه قطعه جلوگیری به عمل آید. در این نمونه، سطح برش صاف بوده و تغییر شکل سطح برش که از CMM به دست آمده به نمونه اعمال گردیده است. المان بندی نمونه نیز در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۶: مدل المان محدود دوبعدی پس از اعمال تغییر شکل‌های سطح برش و اعمال شرایط مرزی [۱۱]

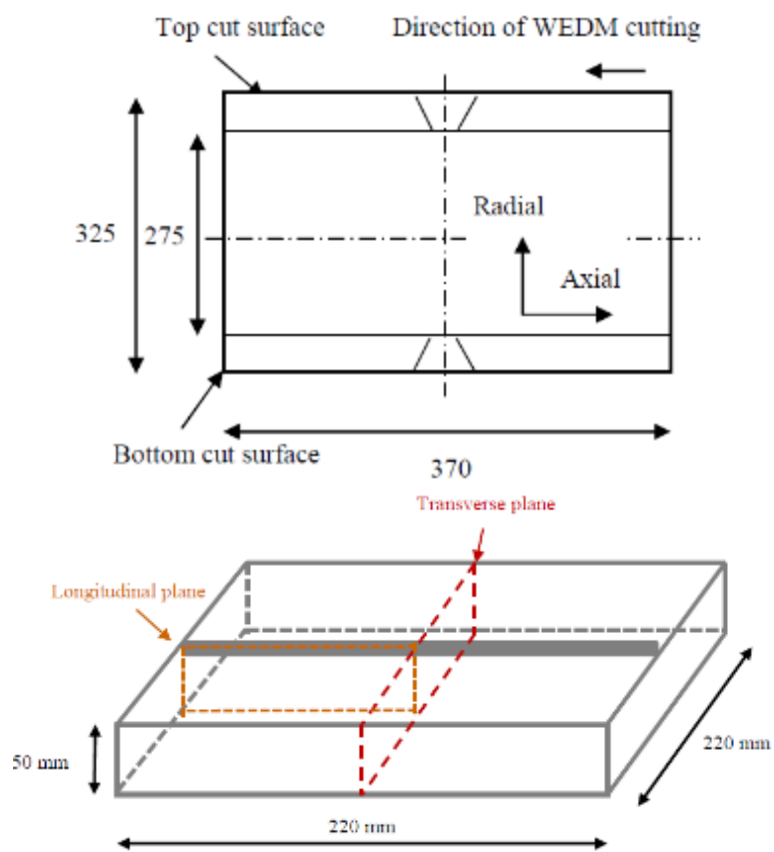
در مقاله معرفی روش کانتور توسط Prime [۱۱] تنش‌های پسماند با استفاده از خمش در یک نمونه ایجاد شده که مقادیر آن کاملاً مشخص است و با استفاده از روش کانتور سعی شده است که مقادیر تنش پسماند با روش کانتور اندازه‌گیری شود. در شکل زیر تنش‌های پسماند در نمونه واقعی و تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده با روش کانتور نمایش داده شده است.



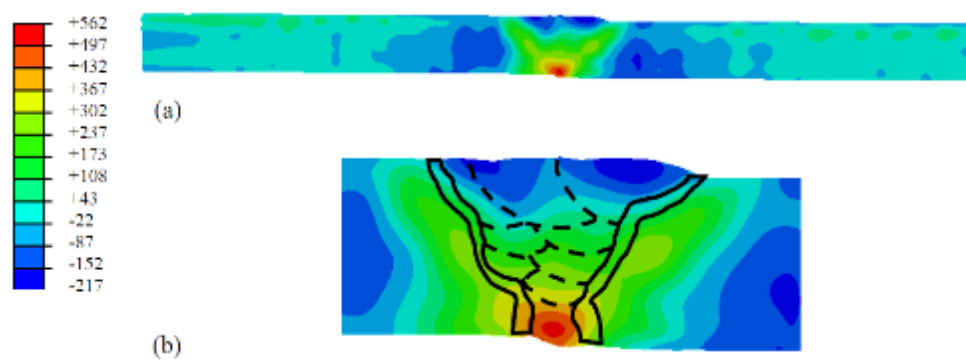
شکل ۱۱-۶: بالا: مقادیر تنش‌های پسماند واقعی در نمونه، پایین: مقادیر تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده با روش کانتور [۱۱]

۴-۲-۶- کاربردهای روش کانتور در اندازه‌گیری تنش پسماند

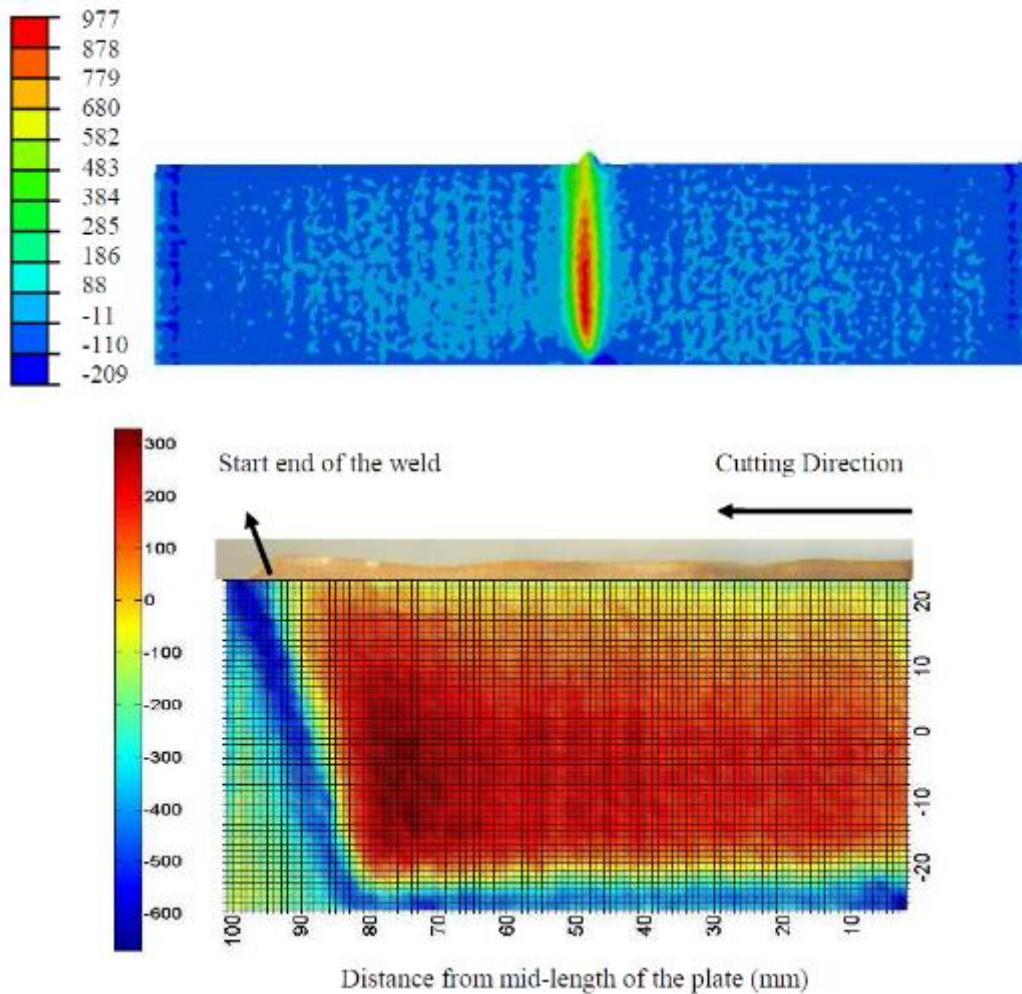
Hosseinzadeh و Bouchard [۱۰۲] با استفاده از روش کانتور به اندازه‌گیری تنش پسماند در یک لوله جوشکاری شده پرداخته‌اند. آنها با استفاده از سیم برنجی با ضخامت ۲۵۰ میکرون لوله را برش داده و با دستگاه CMM با قطر قلم سه میلیمتر و در شبکه‌ای به عرض ۰/۵ mm داده برداری را انجام دادند. با استفاده از 2D cubic spline نیز داده‌های CMM را جهت استفاده در نرم افزار Abaqus هموار نمودند. همچنین در این مقاله جوش یک ورق از آلیاژ تیتانیوم با ضخامت ۵۰ mm نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای این ورق، دو برش، ابتدا یکی در راستای عرضی و سپس یک برش در راستای طولی زده شده است و در نتیجه تنش‌های نرمال در دو جهت محاسبه شدند. در شکل ۶-۱۲ دو هندسه بررسی شده در این مقاله نمایش داده شده است. نتایج حاصله از روش کانتور نیز برای لوله در شکل ۶-۱۳ و برای صفحه تیتانیوم در شکل ۶-۱۴ آورده شده است.



شکل ۱۲-۶: هندسه لوله و ورق جوش داده شده در مرجع [۱۰۲]



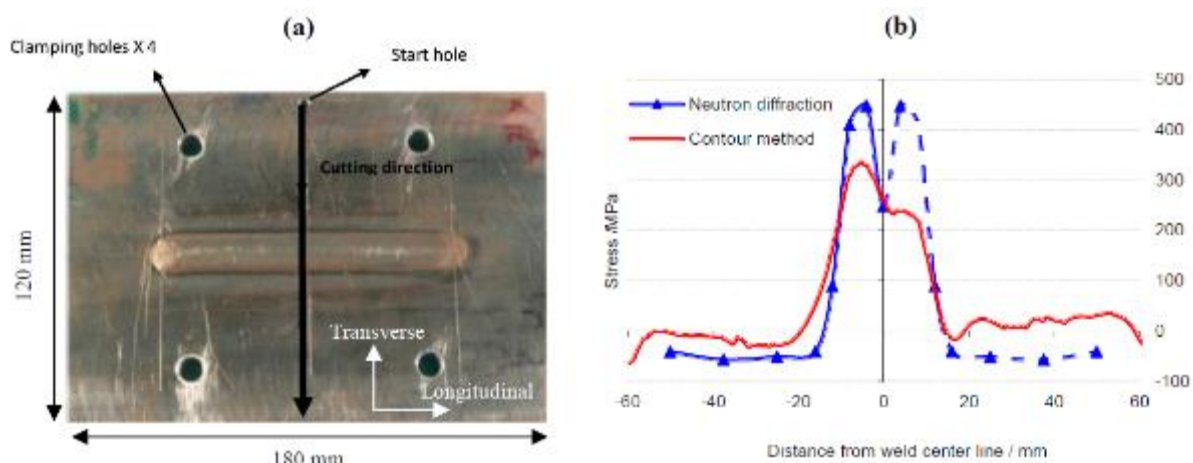
شکل ۱۳-۶: تنش پسماند در جوش چند پاسه لوله [۱۰۲]



شکل ۱۴-۶: تنش پسماند در راستای طولی (بالا) و عرضی (پایین) جوش ورق تیتانیوم [۱۰۲]

همانطور که از شکل بالا مشخص است، گرادیان تنش پسماند در جوش بسیار زیاد است. به خصوص اینکه ورق تیتانیوم با روش باریکه الکترونی^{۲۴} جوشکاری شده است که بالاترین گرادیان تنش در بین روش‌های مرسوم جوشکاری را دارا است. در صورتی که مقدار تنش پسماند در نمونه بسیار بالا باشد (بالاتر از ۸۰٪ تنش تسلیم ماده)، در آن صورت ممکن است که با برش انجام گرفته روی نمونه، کرنش پلاستیک در نمونه ایجاد شده و تنش‌های پسماند بازتوزیع شوند. Traore و همکارانش [۱۰۳] برای جوش یک ورق با ضخامت ۲۰ mm روش کانتور را به کار گرفتند. با توجه به مقادیر بسیار زیاد تنش پسماند در جوش، تحت اثر برش تنش‌های پسماند بازتوزیع می‌یابند که در شکل زیر کاملاً مشهود است. در این تحقیق نتایج دقیق با استفاده از پراش نوترونی به دست آمده است.

²⁴ Electron Beam



شکل ۱۵-۶: کارایی روش کانتور در محاسبه تنش پسماند جوش [۱۰۳]

امروزه لایه نشانی با جوش^{۲۵} کاربرد بسیار زیادی در صنایع مختلف و از جمله صنایع نیروگاهی دارد. یکی از مهمترین راهکارها جهت بهبود خواص لوله‌های بویلر (در معرض آتش)، استفاده از یک لایه جوش روی لوله با خواص بالاتر از ماده زمینه است. Naveed و همکارانش [۱۰۴] با استفاده از روش کانتور به اندازه‌گیری تنش پسماند ناشی از لایه نشانی فولاد ضد زنگ روی فولاد کم کربن پرداخته‌اند. در شکل ۱۶-۶ هندسه نمونه لایه نشانی شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند و طریقه فیکس کردن آن برای برش نمایش داده شده است.

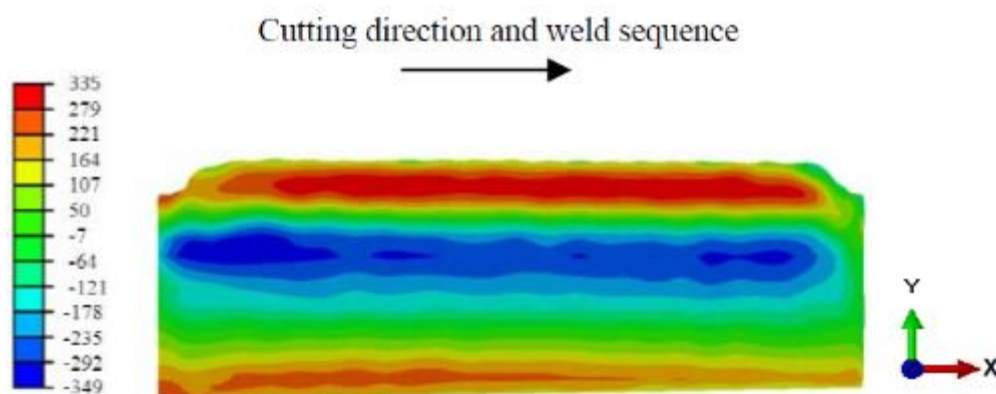


شکل ۱۶-۶: راست: هندسه نمونه لایه نشانی شده چپ: طریقه فیکس کردن برای برش WEDM [۱۰۴]

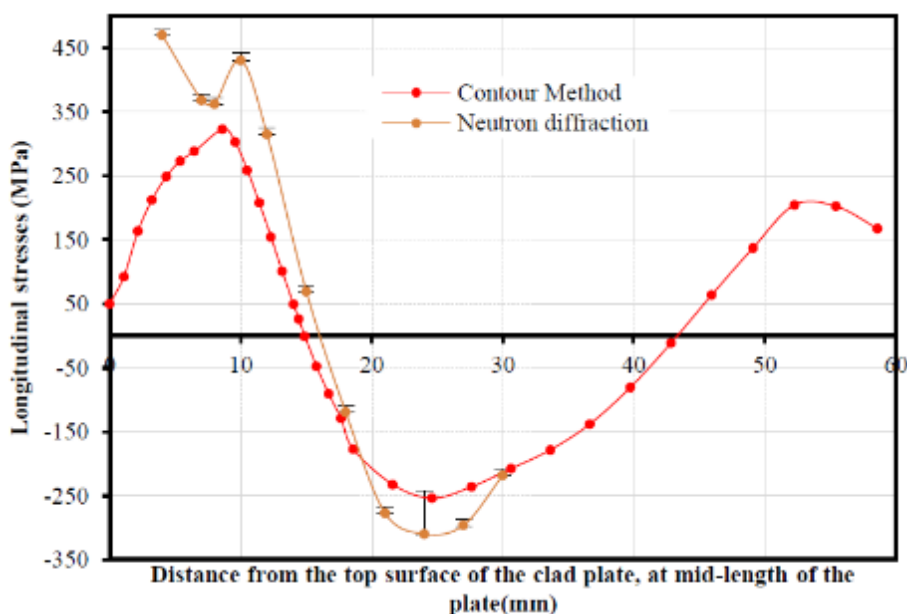
در شکل زیر نتیجه به دست آمده برای تنش پسماند با استفاده از روش کانتور آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود این روش توانسته است به خوبی گرادیان تنش بسیار بالا در فرایند لایه نشانی را اندازه‌گیری کند. جهت ارزیابی قابلیت‌های روش کانتور در اندازه‌گیری تنش پسماند روش لایه نشانی، با استفاده از روش پراش نوترونی تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شد و

²⁵ Cladding

در شکل ۶-۱۷ مقایسه بین روش کانتور و پراش نوترونی آورده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت غیر از سطح، در مابقی نواحی روش کانتور به خوبی توانسته است که تنش‌های پسماند را اندازه‌گیری کند.



شکل ۶-۱۷: تنش‌های پسماند ناشی از لایه نشانی فولاد ضد زنگ روی فولاد کم کربن [۱۰۴]

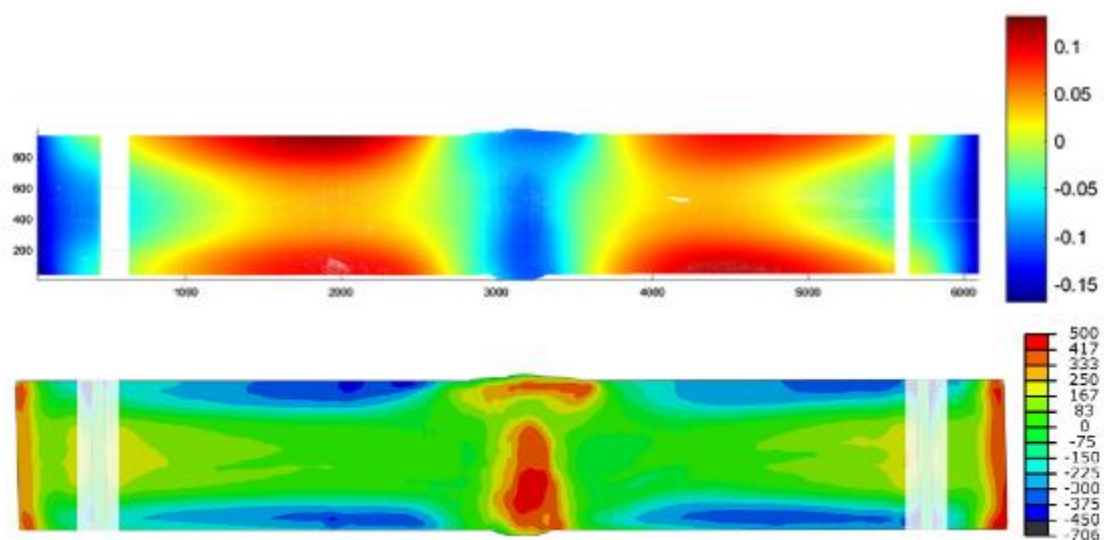


شکل ۶-۱۸: مقایسه دو روش کانتور و پراش نوترونی در اندازه‌گیری تنش پسماند لایه نشانی [۱۰۴]

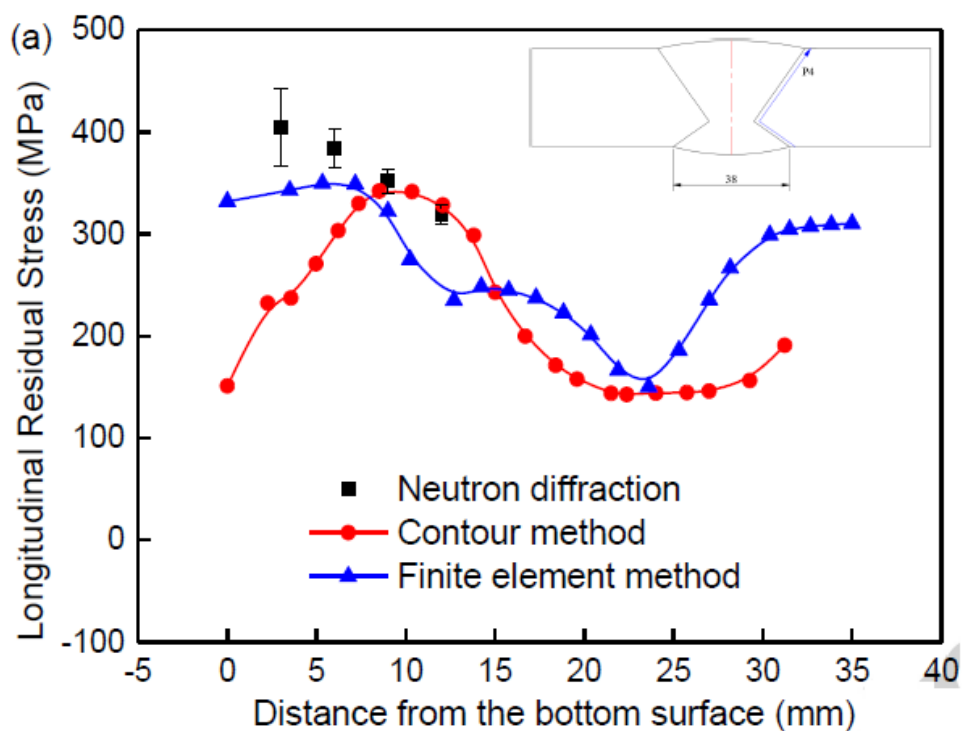
Jacob و همکارانش [۱۰۵] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش کانتور تنش‌های پسماند را در جوش پایه^{۲۶} توربین‌های بادی فراساحل محاسبه کردند و مشاهده نمودند که مقادیر تنش پسماند بسیار زیاد بوده و با توجه به شرایط سخت محیطی و تنش‌های این پایه‌ها در معرض آن قرار دارند، لازم است که تدابیر مناسب اندیشیده شود. در شکل زیر تنش پسماند در جوش این پایه‌ها نمایش داده شده است.

²⁶ Monopole

در شکل ۶-۲۰ نیز کارایی روش کانتور در اندازه‌گیری تنش پسماند جوش چند پاسه تصویر شده است. کاملاً مشخص است که این روش غیر از نزدیکی سطح پایینی و بالایی، در مابقی نواحی دقت بسیار بالایی در اندازه‌گیری تنش پسماند جوش دارد [۱۰۶]. در مراجع [۱۰۷-۱۰۹] نیز مقادیر تنش پسماند در جوش که با روش کانتور محاسبه شده‌اند، با استفاده از پراش نوترونی، آلمان محدود و XRD صحنه گذاری شده‌اند.



شکل ۱۹-۶: بالا: اعوجاج سطح اندازه‌گیری شده با CMM و پایین: تنش پسماند در جوش پایه توربین بادی فراساحل [۱۰۵]



شکل ۲۰-۶: کارایی روش کانتور در اندازه‌گیری تنش پسماند جوش چند پاسه [۱۰۶]

استفاده از برش‌های چندگانه [۱۱۰]، تلاش برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش کانتور برای حالتی که تنش پسماند مقداری نزدیک به تنش تسلیم دارد [۱۱۱-۱۱۳]، استفاده از روش کانتور برای هندسه‌های پیچیده و دارای حفره [۱۱۴] جزو تلاش‌هایی که اخیراً در این حوزه در حال انجام است.

۳-۶- روش سوراخکاری مرکزی

این روش پرکاربردترین روش اندازه‌گیری تنش پسماند است که طبقه اجرای آن نیز در قالب یک استاندارد تدوین شده است. خرابی ایجاد شده توسط این روش بسیار محدود بوده و به راحتی قابل تعمیر است و به همین جهت این روش جزو روش‌های نیمه مخرب دسته بندی می‌شود. در ابتدا کلیاتی از این روش بیان می‌شود و سپس استاندارد تدوین شده برای این روش سوراخکاری مرکزی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

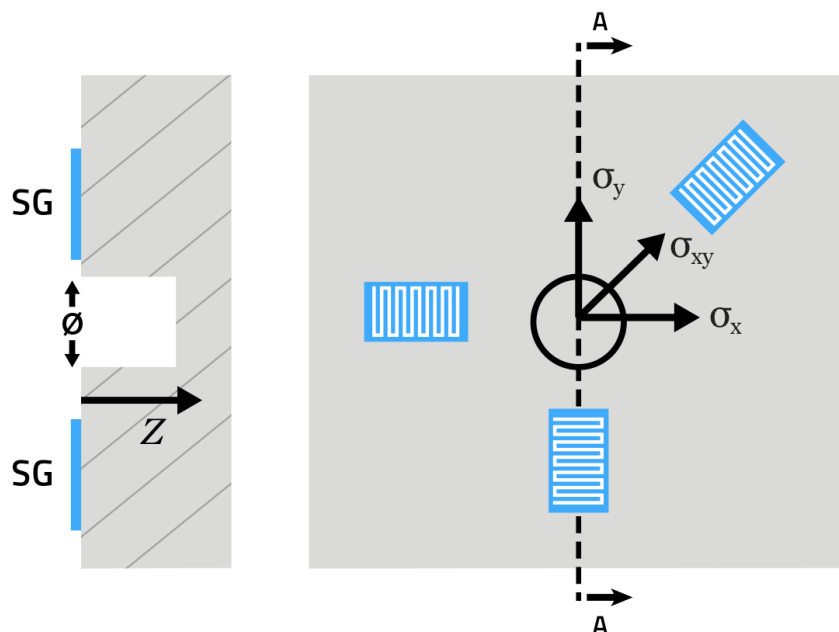
۱-۳-۶- کلیات روش سوراخکاری مرکزی

روش سوراخکاری مرکزی بر کرنش آزاد شده حین آزادسازی تنش پسماند حین فرایند سوراخکاری استوار است. تنش‌های پسماند همیشه در تعادل هستند به همین جهت با حذف بخشی از ماده که تنش پسماند دارد باید توزیع تنش به صورتی تغییر کند که همچنان در تعادل باقی بماند. کرنش‌های سطحی معمولاً با استفاده از یک کرنش‌سنج rosette که مرکز آن در مرکز سوراخ است، اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از سه کرنش‌سنج می‌توان تنش‌ها در دو جهت را محاسبه کرد (i.e. σ_{xx} , σ_{yy} and σ_{xy}). ابعاد استاندارد کرنش‌سنج برای قطر سوراخ‌های ۱ mm، ۲ mm و ۴ mm موجود است که به ترتیب قادر به محاسبه تنش پسماند تا عمق‌های ۰/۵ mm، ۱ mm و ۲ mm است. روش سوراخکاری مرکزی با کرنش‌سنج تکنیک نیمه مخرب و به دلیل تأثیر اندک سوراخ کم‌عمق بر رفتار سازه روشی غیر مخرب است که برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از کرنش آزاد شده به کار می‌رود. به طور خلاصه می‌توان این روش را به شش مرحله اصلی تقسیم کرد.

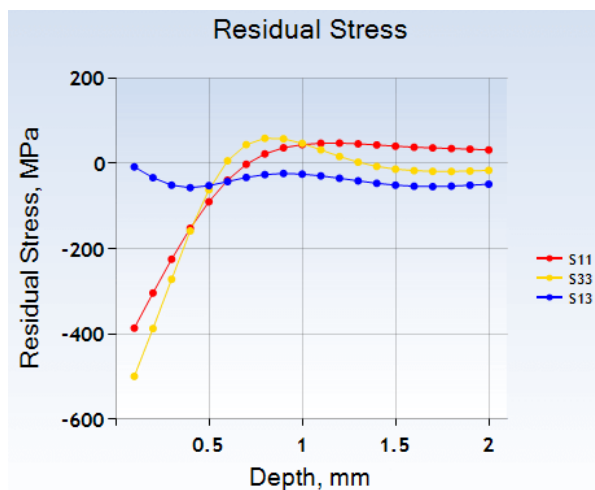
- ۱- نصب کرنش‌سنج سه المانی بر روی قطعه کار و در جایی که تنش پسماند باید اندازه‌گیری گردد.
- ۲- سیم بندی کرنش‌سنج‌ها و ارتباط دادن آن با وسیله نمایشگر کرنش.
- ۳- نصب بوش راهنمای دقیق سوراخکاری در مرکز دستگاه کرنش‌سنج.
- ۴- ایجاد سوراخ کوچک بر روی قطعه کار بعد از صفر کردن و بالانس کردن دستگاه.
- ۵- خواندن کرنش آزاد شده مربوط به تنش پسماند داخل قطعه کار.
- ۶- استفاده از روابط موجود و بدست آوردن ماکزیمم تنش و زاویه آن نسبت به گیج‌های کرنش‌سنج

خطا در اندازه‌گیری قطر و عمق سوراخ، هم مرکز نبودن کرنش‌سنج‌ها با سوراخ، زبری سطح، مسطح نبودن سطح، آماده‌سازی نامناسب نمونه‌ها و دقت پایین کرنش‌سنج‌ها سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری تنش پسماند می‌شود. با این وجود این روش بیشترین کاربرد را برای اندازه‌گیری تنش پسماند به سبب ارزان بودن، سریع بودن و قابل دسترس بودن برای همگان چه در محیط آزمایشگاهی و چه در محیط صنعتی دارد.

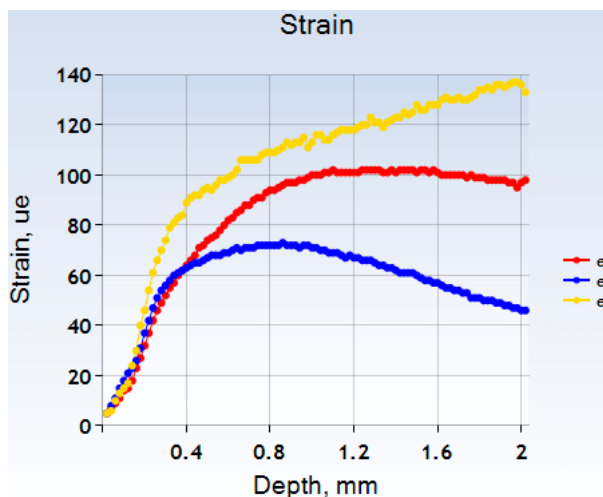
قطر سوراخ D_0 و قطر متوسط دایره کرنش‌سنج‌ها برابر D می‌باشد. بین نزدیک‌ترین مکان کرنش‌سنج‌ها به لبه سوراخ حداقل باید 0.3 mm فاصله باشد که این حداکثر قطر سوراخ D_0 را نسبت به D تعیین می‌کند. حداقل قطر سوراخ نیز برابر 60% قطر حداکثری سوراخ می‌باشد. با توجه به اینکه با افزایش D_0 دقت کرنش‌سنجی با نسبت $(D_0/D)^2$ افزایش می‌یابد لذا حتی‌الامکان از سوراخ‌های با قطر بیشتر بایستی استفاده کرد. یک نمونه از کرنش‌های اندازه‌گیری شده و تنش‌های پسماند به دست آمده از محاسبات در شکل ۶-۲۲ آورده شده است.



شکل ۶-۲۱: موقعیت کرنش‌سنج‌ها نسبت به سوراخ مرکزی [۳]



تنش پسماند پس از انجام محاسبات



کرنش اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج

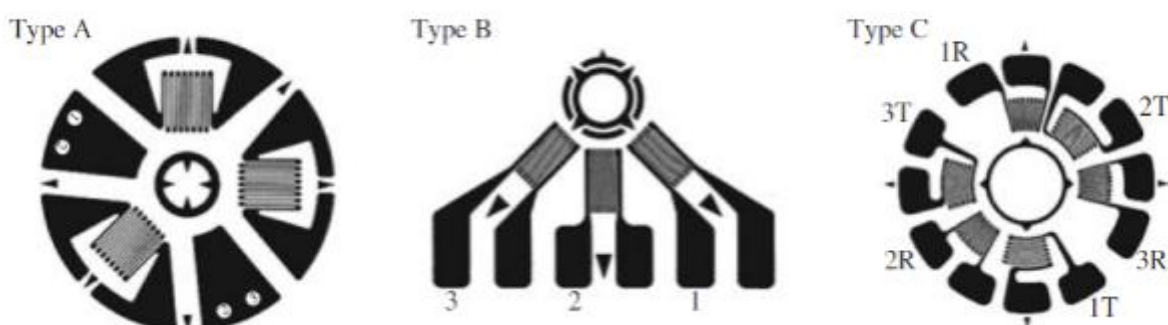
شکل ۶-۲۲: یک نمونه از کرنش اندازه‌گیری شده و تنش‌های پسماند به دست آمده از محاسبات [۳]

۲-۳-۶- الزامات استاندارد ASTM E837-08

این استاندارد مربوط به اندازه‌گیری تنش پسماند با روش سوراخکاری مرکزی است. بر اساس این استاندارد، امکان اندازه‌گیری تنش پسماند برای قطعات بسیار نازک (ضخامت ورق بسیار کمتر از قطر سوراخ) تا قطعات ضخیم (ضخامت بالاتر از قطر سوراخ) امکان پذیر است. البته لازم به ذکر است که برای قطعات نازک تنها امکان اندازه‌گیری تنش پسماند یکنواخت وجود دارد.

این روش برای مواد الاستیک خطی کاربرد دارد و در صورتی که تنش پسماند بالاتر از ۵۰٪ تنش تسلیم یا تنش پسماند برشی بالاتر از ۲۵٪ تنش تسلیم باشد، امکان دارد که در ناحیه سوراخکاری ماده وارد ناحیه تسلیم شود. با این حال با توجه به آنچه در عمل دیده شده است، در صورتی که تنش پسماند از ۶۰٪ تنش تسلیم بالاتر نباشد، جواب‌های به دست آمده دقت خوبی دارند.

در این استاندارد ورق با ضخامت کمتر از $0.4D$ برای رزت‌های نوع A و B و ورق با ضخامت کمتر از $0.48D$ برای رزت نوع C ورق نازک لحاظ می‌شود. همچنین ورق‌های بزرگ‌تر از $1.2D$ برای رزت‌های نوع A و B و ورق با ضخامت $1.44D$ برای رزت نوع C ورق ضخیم در نظر گرفته می‌شود (در حالت کلی، ضخامت ورق در رزت نوع C، ۲۰٪ بالاتر از رزت‌های نوع A و B است). در صورتی که ورق نازک باشد، سوراخ راه به در زده شده و کرنش‌ها یکبار محاسبه می‌شوند ولی در ورق ضخیم هر بار تا عمق $h=0.05D$ و تا عمق نهایی $0.4D$ (مرحله ۸) سوراخ زده شده و در هر مرحله کرنش‌ها و تنش‌ها محاسبه می‌شود. برای ورق به ضخامت بین $0.4D$ و $1.2D$ استاندارد روشی را بیان نکرده است. انواع رزت‌ها در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۲۳-۶: انواع مختلف کرنش‌سنج برای استفاده در سوراخکاری مرکزی [۴]

برای اندازه‌گیری تنش پسماند، سطح صاف بایستی انتخاب شود. استفاده از سمباده یا سنگ زنی به دلیل تغییر در میزان تنش‌های پسماند اکیدا ممنوع می‌باشد. اچ کردن شیمیایی^{۲۸} برای این روش مجاز است. کرنش‌سنج‌ها در اطراف سوراخ و در یک دایره بایستی قرار گیرند. کرنش سنج شماره یک که کرنش سنج مرجع است در زاویه صفر درجه، کرنش سنج شماره ۲ در زاویه ۴۵ یا ۱۳۵ درجه و کرنش سنج شماره ۳ عمود بر کرنش سنج شماره ۱ بایستی واقع شوند. شماره‌بندی کرنش‌سنج‌ها به صورت ساعتگرد از ۱ تا ۳ است. بهتر است که از کرنش سنج‌های استاندارد که برای اندازه‌گیری تنش پسماند با روش سوراخکاری مرکزی، ساخته شده‌اند استفاده کرد. کرنش سنج نوع A در شکل ۶-۲۳ پرکاربردترین نوع کرنش‌سنج است. نوع

²⁷ Rosette

²⁸ Chemical Etching

B برای حالتی مناسب است که محل سوراخ در نزدیکی یک برآمدگی یا لبه است و در نتیجه امکان نصب کرنش‌سنج نوع A وجود ندارد. نوع C برای موادی که ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند (مانند پلاستیک‌ها) و یا برای مقادیر کم تنش پسماند کاربرد دارد. با استفاده از این نوع کرنش‌سنج‌ها، تأثیر افزایش دما ناشی از سوراخکاری و در نتیجه کرنش حرارتی در داده‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج بسیار کم می‌شود. مرکز کرنش‌سنج‌ها بایستی حداقل در فاصله $1.5 D$ نسبت به نزدیکترین لبه قرار گیرد. در صورت استفاده از رزت نوع B باید در فاصله حداقل $0.5 D$ نسبت به مانع نصب شود. ابزار ایجاد سوراخ بهتر است که مته از جنس کاربید داشته باشد و با استفاده از توربین^{۲۹} یا الکتروموتور با سرعتی بین ۵۰۰۰۰ rpm الی ۴۰۰۰۰ rpm داشته باشد.

در جدول ۶-۲ مقادیر پیشنهادی از سوی استاندارد برای ضخامت نمونه، قطر سوراخ و عمق گام‌ها برای رزت‌های مختلف و دو حالت تنش یکنواخت و غیریکنواخت ارائه شده است. کرنش اندازه‌گیری شده با توان دوم ابعاد سوراخ تغییر می‌کند به همین جهت، مقادیر بزرگتر سوراخ در جدول زیر ارجحیت دارند.

جدول ۶-۲: مقادیر پیشنهادی برای ضخامت نمونه، قطر سوراخ و عمق گام‌ها [۴]

TABLE 2 Recommended Workpiece Thicknesses, Hole Diameters and Depth Steps ^a									
Rosette Type	D	Max. thickness of a "Thin" workpiece	Min. thickness of a "Thick" workpiece	Uniform Stresses			Non-Uniform Stresses		
				Min. hole diameter	Max. hole diameter	Practical depth steps ^b	Min. hole diameter	Max. hole diameter	Practical depth steps ^b
Type A									
Conceptual	D	0.4 D	1.2 D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.05 D	Min D ₀	Max D ₀	0.01 D
1/32 in. nominal	0.101 (2.57)	0.040 (1.03)	0.121 (3.08)	0.024 (0.61)	0.040 (1.01)	0.005 (0.25)	0.037 (0.93)	0.040 (1.00)	0.001 (0.025)
1/16 in. nominal	0.202 (5.13)	0.081 (2.06)	0.242 (6.17)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.010 (0.25)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)
1/8 in. nominal	0.404 (10.26)	0.162 (4.11)	0.485 (12.34)	0.132 (3.35)	0.220 (5.59)	0.020 (0.50)	0.150 (3.75)	0.170 (4.25)	0.004 (0.10)
Type B									
Conceptual	D	0.4 D	1.2 D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.05 D	Min D ₀	Max D ₀	0.01 D
1/16 in. nominal	0.202 (5.13)	0.081 (2.06)	0.242 (6.17)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.010 (0.25)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)
Type C									
Conceptual	D	0.48 D	1.44 D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.0575 D	Min D ₀	Max D ₀	0.0115 D
1/16 in. nominal	0.170 (4.32)	0.082 (2.07)	0.245 (6.22)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.010 (0.25)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)

^a Dimensions are in inches (mm).

برای اندازه‌گیری ورق‌های ضخیم، بایستی در گام‌های $0.105 D$ و در هشت مرحله (تا عمق $0.4 D$) کرنش‌ها را ثبت کرد. برای رزت نوع C گام‌ها $0.106 D$ است.

۱-۲-۳-۶- محاسبه تنش پسماند برای تنش یکنواخت ورق‌های نازک

این مورد ساده‌ترین حالت اندازه‌گیری تنش پسماند است. در این حالت تنها یک اندازه‌گیری انجام می‌شود و سوراخ نیز به صورت راه به در است. این حالت در ادامه توضیح داده می‌شود و حالات دیگر که برای تنش‌های غیر یکنواخت و برای ورق‌های ضخیم است، در استاندارد به صورت کامل توضیح داده شده و بایستی به آن رجوع کرد.

²⁹ Air turbine

کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش سنج‌ها ϵ_1 ، ϵ_2 و ϵ_3 می‌باشد. پارامترهای p ، q و t از روابط زیر به دست می‌آید

$$\begin{aligned} p &= \frac{(\epsilon_3 + \epsilon_1)}{2} \\ q &= \frac{(\epsilon_3 - \epsilon_1)}{2} \\ t &= \frac{(\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)}{2} \end{aligned} \quad (6-3)$$

با استفاده از جدول ۳-۶ ثوابت کالیبراسیون $\bar{a}$ و $\bar{b}$ برای رزت نوع A به دست می‌آید (برای رزت نوع B و C جداول دیگری در استاندارد ذکر شده است). با استفاده از این پارامترها می‌توان پارامترهای P ، Q و T را از روابط زیر به دست آورد.

$$\begin{aligned} P &= \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} = -\frac{Ep}{\bar{a}(1+\nu)} \\ Q &= \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} = -\frac{Eq}{\bar{b}} \\ T &= \tau_{xy} = -\frac{Et}{\bar{b}} \end{aligned} \quad (6-4)$$

که در اینجا

P =isotropic (equi-biaxial) stress

Q =45° shear stress

T =xy shear stress

می‌باشند. مقادیر تنش در جهات X و Y نیز از روابط زیر حاصل می‌شوند.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= P - Q \\ \sigma_y &= P + Q \\ \tau_{xy} &= T \end{aligned} \quad (6-5)$$

تنش‌های اصلی نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شوند

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (6-6)$$

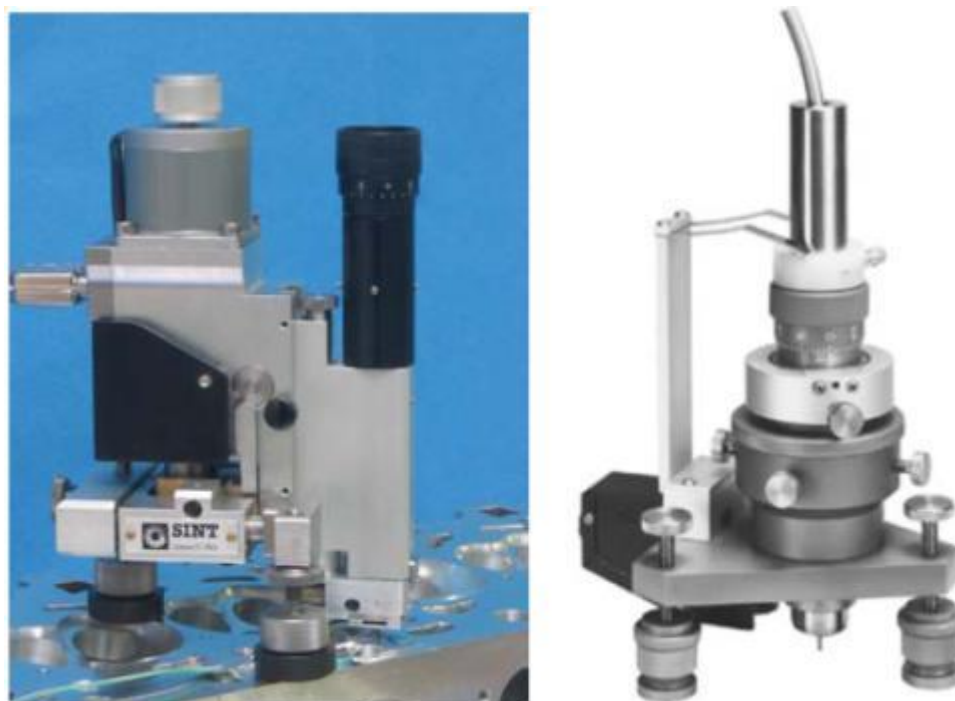
جدول ۳-۶: مقادیر ضرایب $\bar{a}$ و $\bar{b}$ برای رزت نوع A و تنش یکنواخت

Rosette A Blind hole Depth/D	$\bar{a}$					$\bar{b}$				
	Hole Diameter, D_H/D					Hole Diameter, D_H/D				
	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
0.05	.027	.037	.049	.063	.080	.051	.069	.090	.113	.140
0.10	.059	.081	.108	.138	.176	.118	.159	.206	.255	.317
0.15	.085	.115	.151	.192	.238	.180	.239	.305	.375	.453
0.20	.101	.137	.177	.223	.273	.227	.299	.377	.459	.545
0.25	.110	.147	.190	.238	.288	.259	.339	.425	.513	.603
0.30	.113	.151	.195	.243	.293	.279	.364	.454	.546	.638
0.35	.113	.151	.195	.242	.292	.292	.379	.472	.566	.657
0.40	.111	.149	.192	.239	.289	.297	.387	.482	.576	.666
Through Hole	.090	.122	.160	.203	.249	.288	.377	.470	.562	.651

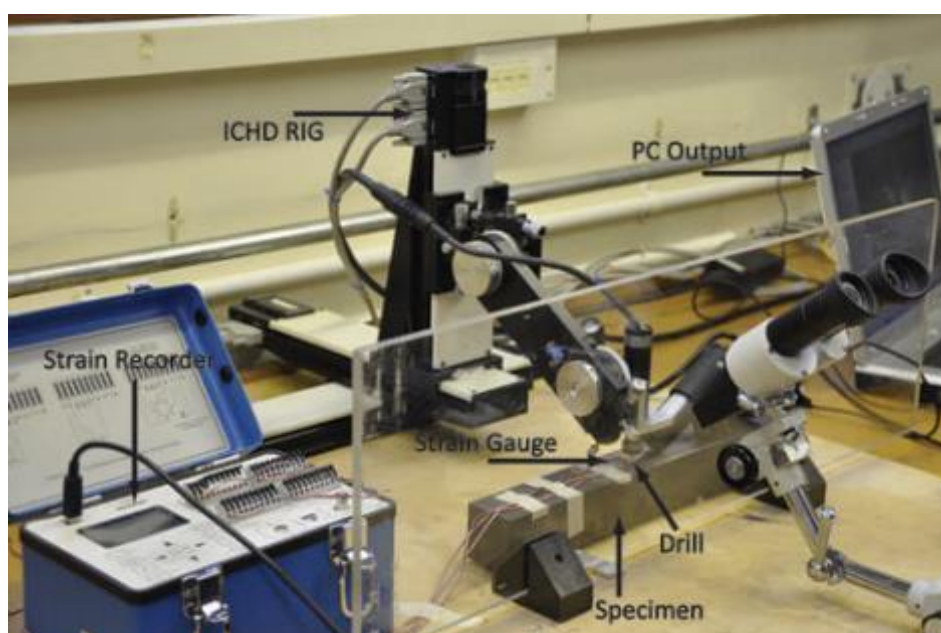
برای ورق‌های ضخیم اندازه‌گیری تنش عموماً در ضخامت $D/4$ انجام می‌پذیرد. می‌توان فقط از مقادیر کرنش در این عمق برای محاسبه تنش استفاده کرد اما میانگین‌گیری نتایج در عمق‌های مختلف سبب افزایش چشمگیر دقت جواب‌ها می‌شود.

۳-۳-۶- تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی

شکل زیر دو نمونه از دستگاه روش سوراخ مرکزی را برای محاسبه تنش پسماند نشان می‌دهد. در شکل ۶-۲۵ نیز تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی نمایش داده شده است.

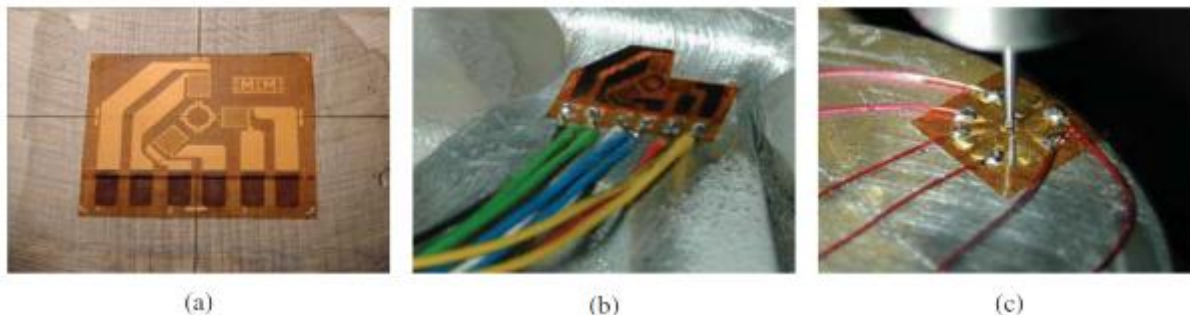


شکل ۶-۲۴: دو نمونه از دستگاه‌های ایجاد سوراخ در روش سوراخکاری مرکزی [۱]



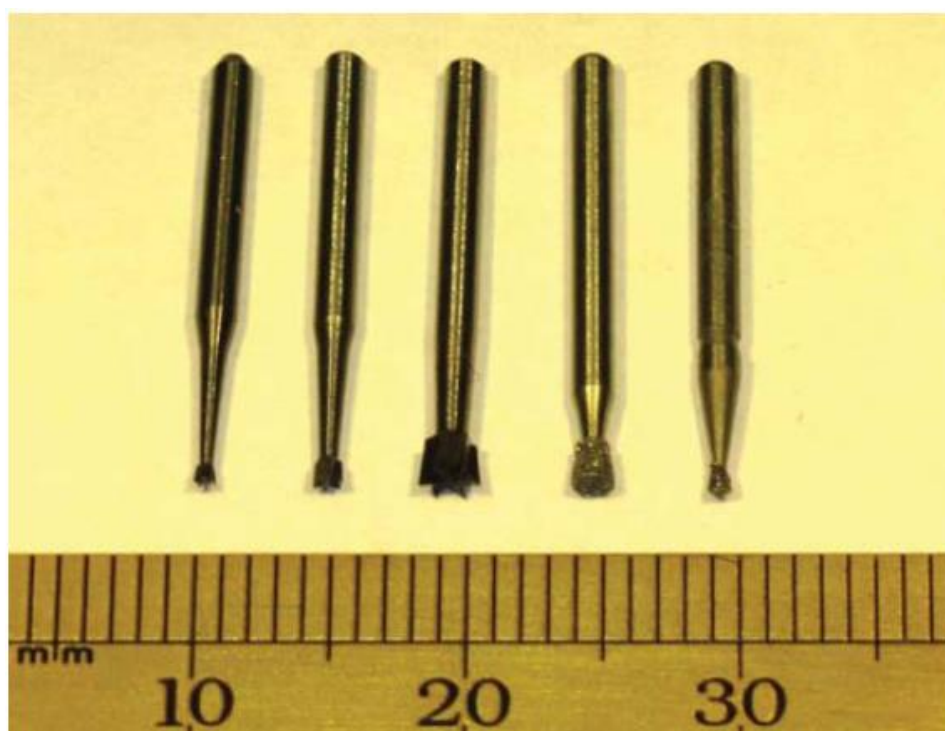
شکل ۲۵-۶: مجموعه تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی

در چند دهه اخیر کرنش‌سنج‌های مخصوصی برای روش سوراخکاری مرکزی تولید می‌شوند که با استفاده از آن‌ها دیگر به تنظیم محل سوراخ و محل کرنش‌سنج‌ها نیازی نیست. در این کرنش‌سنج‌ها محل سوراخ کاملاً مشخص است. مشخصات این سه نوع کرنش‌سنج در استاندارد ASTM E837 [۴] آمده است. در شکل ۶-۲۶ نیز نمایی از اتصال کرنش‌سنج‌ها به نمونه و سوراخکاری آن آورده شده است.



شکل ۲۶-۶: چپ: اتصال کرنش‌سنج به نمونه، وسط: اتصال سیم‌ها به کرنش‌سنج و راست: ایجاد سوراخ با دریل مخصوص [۱]

در شکل ۶-۲۷ برخی از مته‌های استفاده شده برای روش سوراخکاری مرکزی نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که استفاده از برخی از آن‌ها، نیاز به مهارت بالایی دارد و معمولاً از مته سمت چپ استفاده می‌شود.



شکل ۲۷-۶: مته‌های استفاده شده برای ایجاد سوراخ در روش سوراخکاری مرکزی [۱]

۴-۳-۶- منابع ایجاد خطا در روش سوراخکاری مرکزی

مهمترین منابع ایجاد خطا در روش سوراخکاری مرکزی به شرح زیر می‌باشند [۱].

نمونه و نصب کرنش سنج

- آماده سازی سطح
- خصوصیات مواد (مدول یانگ، ضریب پواسون و تنش تسلیم)، همگن بودن و ایزوتروپ بودن ماده
- دسترسی به محل اندازه‌گیری
- وجود گرادیان تنش
- هندسه (نزدیک لبه یا سوراخ)، ضخامت و انحنا
- موقعیت کرنش سنج روی سطح نمونه
- مقاومت و ضخامت چسب استفاده شده برای اتصال کرنش سنج‌ها

سوراخکاری

- ناهمترازی سوراخ (جابجایی وزاویه نسبت به محور کرنش سنج)
- تعیین عمق و عمق هر گام
- پروفیل سوراخ (قطر، گردی، شعاع گوشه)
- پارامترهای سوراخکاری (سرعت و feed)، شرایط (سایش) و تنش ایجاد شده حین سوراخکاری
- افزایش دمای ایجاد شده حین سوراخکاری

ثبت کرنش

- نمایش کرنش صفر قبل از سوراخکاری
- نویز در خروجی کرنش سنج
- دقت ابزارها (رزولوشن و خطی بودن)

محاسبه تنش پسماند

- قابلیت اجرای روش انتگرال برای مواد، نمونه و سوراخ

اپراتور

- آموزش اپراتور، مهارت و تجربه

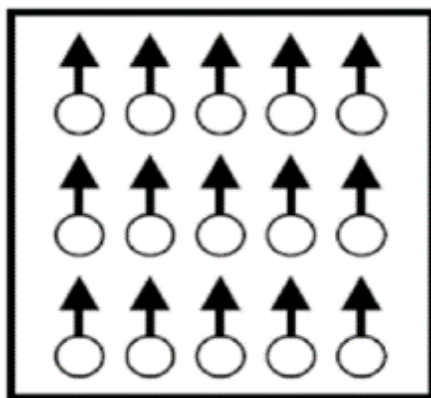
۶-۴- روش مغناطیسی

روش‌های مغناطیسی نسبت به روش‌های دیگر اندازه‌گیری تنش، دارای مزایایی از جمله سرعت بالا، غیرمخرب بودن، اندازه‌گیری در محل و قیمت پایین می‌باشند. خواص مغناطیسی همچنین نسبت به سایر ویژگی‌های نمونه مورد آزمایش از جمله میکروساختار و سختی نیز حساس هستند [۱۱۵] با وجود حساسیت بالای این تکنیک به تنش‌های داخلی، این روش‌ها پیچیده

بوده و در گذشته کمتر مورد توجه بوده است. در دو دهه اخیر، پیشرفت‌های مهمی در فهم اصول فیزیکی این روش انجام شده و این روش به روشی عملی و کاربردی مبدل شده است.

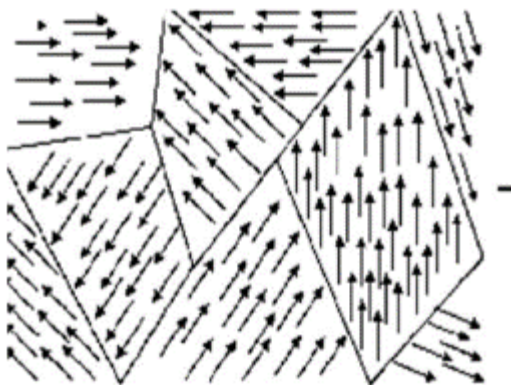
۱-۴-۶- حوزه‌های مغناطیسی

در حالت کلی هر ذره با بار الکتریکی اگر دارای حرکت باشد، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. الکترون به عنوان یک ذره باردار هم دارای حرکت چرخشی در محدوده ابر الکترونی است و هم دارای حرکت دورانی حول محور عبوری از خود. حرکت میدان الکتریکی و جریان الکترون‌ها به نوبه خود گشتاور مغناطیسی خاصی تولید می‌کند که جهت این گشتاورها با قاعده دست راست به دست می‌آید. گشتاور مغناطیسی کل اتم، برآیند این دو گشتاور خواهد بود. یک منطقه کوچک از ماده که دارای ویژگی مغناطیسی مشترک باشد حوزه مغناطیسی نامیده می‌شود. در داخل هر حوزه مغناطیسی در مواد فرومغناطیسی، مطابق نمای شماتیک نمایش داده شده در شکل ۲۸-۶، بردارهای گشتاور مغناطیسی اتم‌ها، موازی می‌باشند.



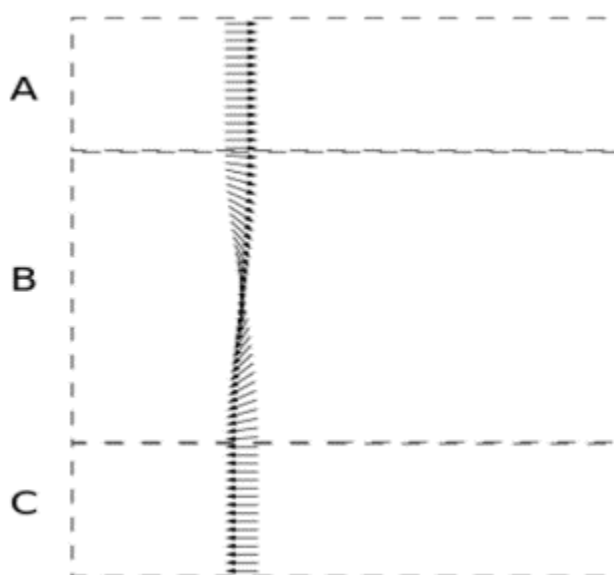
شکل ۲۸-۶: حوزه مغناطیسی و گشتاورهای مغناطیسی اتم‌ها [۱۱۵]

حوزه مغناطیسی می‌تواند بلور، دانه یا بخشی از آن باشد. هر قطعه دارای حوزه‌های مغناطیسی بیشمار است. در حالت کلی، اتم‌های مجاور در یک بلور، دارای گشتاورهای مغناطیسی هم جهت با اتم‌های بلور مجاور نیستند و گشتاورهای مغناطیسی در مواد جهت‌های تصادفی دارند.



شکل ۲۹-۶: حوزه‌های مغناطیسی با جهت‌های مغناطیسی تصادفی

حوزه‌های مغناطیسی را دیواره‌های مغناطیسی از هم جدا می‌کنند. به عبارت دیگر، دیواره مغناطیسی مرز بین حوزه‌های با جهت‌های متفاوت هستند. برآیند حوزه‌های مغناطیسی نسبت به هم دارای زاویه‌های خاصی می‌باشند و دیواره‌های مغناطیسی با زاویه بین امتدادهای دو حوزه مشخص می‌شوند. در شکل ۶-۳۰ دیواره‌های مغناطیسی ۱۸۰ درجه نمایش داده شده‌اند. در داخل مواد فرومغناطیس حوزه‌های مغناطیسی با جهت‌های مغناطیسی تصادفی قرار دارند. هنگام اعمال میدان مغناطیسی به نمونه، می‌توان اثر آن را به صورت حرکت دیواره‌های مغناطیسی، چرخش دیواره‌های مغناطیسی، جوانه‌زنی دیواره و از بین رفتن دیواره مشاهده کرد. این اثر به علت واکنش دیواره‌های در حال حرکت و وجود عیوب متالورژیک در ماده بوده و میزان بروز این اثر نیز به این عوامل بستگی دارد [۱۱۶].



شکل ۶-۳۰: دیواره‌های مغناطیسی ۱۸۰ درجه [۱۱۶]

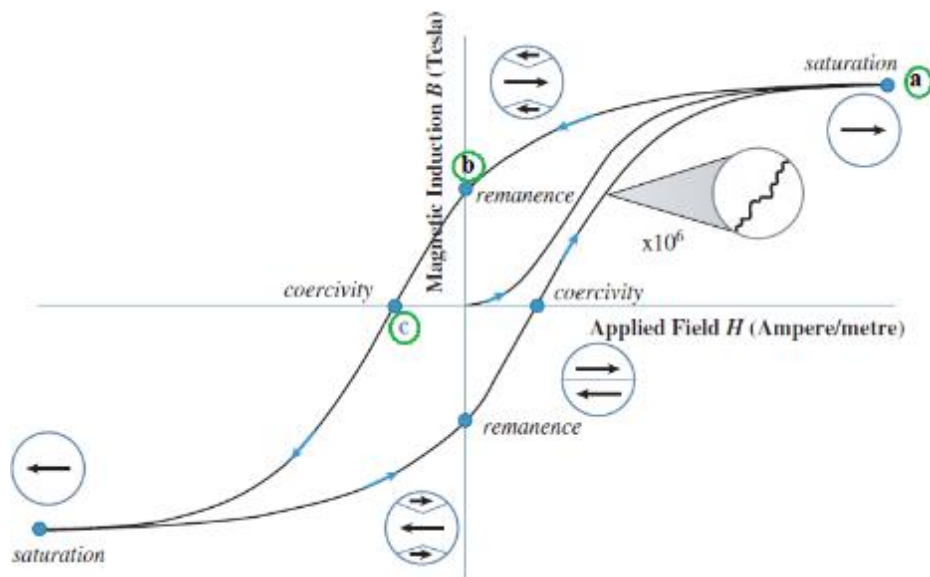
وقتی حوزه‌های مغناطیسی و دیواره‌های آن در اثر میدان اعمالی از خارج تغییر جهت می‌دهند یا حرکت می‌کنند، در اثر تغییر جهت حوزه‌های مغناطیسی، میدان مغناطیسی خاصی تولید می‌شود که ناشی از همین تغییر جهت‌ها خواهد بود. در سال ۱۹۱۸، Barkhausen پدیده حرکت دیواره‌های مغناطیسی را مطرح کرد. طبق نظر او، این پدیده در داخل مواد فرومغناطیس و در زمانی که به این مواد میدان مغناطیسی اعمال می‌شود، اتفاق می‌افتد. امروزه به این میدان‌های مغناطیسی که در مقایسه با میدان اعمالی بسیار محدود هستند، نویز Barkhausen گفته شده و این پدیده با بزرگنمایی نمودار B-H قابل مشاهده می‌باشند.

در گذشته تصور می‌شد که نویزهای Barkhausen بیشتر به علت چرخش دیواره‌های مغناطیسی است، اما اکنون ثابت شده است که برای تولید نویزهای Barkhausen، پدیده حرکت دیواره‌های مغناطیسی، به چرخش دیواره‌های مغناطیسی غالب است. امروزه روش‌های مختلفی برای آنالیز و بررسی نویزهای Barkhausen ارائه شده است. با استفاده از سیستم‌های ثبت سیگنال‌های آنالوگ می‌توان سیگنال‌های Barkhausen را به صورت متوسط سیگنال، ریشه مجموع مجذورات سیگنال‌ها، طیف توان، مجموع قله‌های نویز Barkhausen و ... مورد بررسی قرار داد [۱۱۷]. اولین تحلیل جامع تنش با امواج مغناطیسی توسط Hunt [۱۱۸] انجام شد. او با استفاده از خاصیت مواد فرومغناطیس توانست تنش قطعات فرومغناطیسی را تخمین بزند.

قبل از ارائه این روش، اندازه‌گیری تنش به اندازه‌گیری کمیت‌هایی از جمله تغییر در ابعاد فیزیکی با استفاده از کرنش سنج‌های مقاومتی خلاصه می‌شد. در روش‌های پیشین به منظور تخمین تنش می‌بایست به نمونه بار اعمال می‌شد تا تغییرات تنش سبب ایجاد تغییرات ابعادی در قطعه شود و این تغییر بعد اندازه گرفته شود. به طور خلاصه در تکنیک مغناطیسی ارائه شده توسط هانت، با اعمال میدان مغناطیسی مشخصی به یک قطعه فولادی، گذردهی مغناطیسی قطعه ثبت می‌گردد. با توجه به اینکه گذردهی مغناطیسی قطعات با داشتن تنش‌های مختلف متفاوت است، با ثبت گذردهی مغناطیسی قطعه‌ای که تحت تنش نیست و یا دارای تنش معلوم است و مقایسه آن با گذردهی مغناطیسی قطعاتی که تنش آنها نامعلوم است، می‌توان تنش موجود را تخمین زد. در این رویه، در مرحله کالیبراسیون مشخصات مغناطیسی سطح بدون تنش بعنوان سطح مرجع شناخته شده و سطوح دیگر نسبت به سطح مرجع مقایسه می‌شوند [۱۱۸]. روش مقایسه‌ای تقریباً در همه تکنیک‌های بررسی مغناطیسی مورد استفاده است و تفاوت عمده بین روش‌ها در موضوع مورد بررسی برای مقایسه می‌باشد.

یکی از بارزترین مشخصات مواد فرومغناطیس، منحنی مغناطیس شونده‌گی (مغناطیدگی) یا چرخه پسماند است. در منحنی مغناطیس شونده‌گی جسم تغییرات گشتاور مغناطیسی ماده در واحد حجم ($\vec{M}$) بر حسب میدان مغناطیسی خارجی ($\vec{H}$) رسم می‌شود. در عمل به جای منحنی M-H منحنی B-H رسم می‌شود که در آن $\vec{B}$ القای مغناطیسی درون ماده است. دلیل وجود این چرخه ناشی از وجود حوزه‌های مغناطیسی متفاوت و متنوع در این مواد است. در حالت کلی، در شرایط طبیعی، برابری گشتاورهای مغناطیسی در مواد فرومغناطیسی برابر با صفر است. به عبارت دیگر در مواد فرومغناطیس، برابری مغناطیسی یک حوزه صفر نیست، اما مجموع گشتاورهای همه حوزه‌ها صفر است. اگر یک ماده فرومغناطیسی در یک میدان مغناطیسی قرار داده شوند و میدان به تدریج افزایش یابد، ابتدا حجم حوزه‌هایی که گشتاور مغناطیسی آنها با میدان هم جهت (یا تقریباً هم جهت) است، افزایش یافته و با افزایش بیشتر شدت میدان و به تدریج برابری گشتاور مغناطیسی حوزه‌های دیگر نیز با چرخش خود در جهت میدان قرار می‌گیرد. سرانجام در یک میدان مغناطیسی نسبتاً قوی گشتاور مغناطیسی تمام حوزه‌ها با میدان مغناطیسی هم جهت می‌شوند و کل نمونه به صورت یک تک حوزه مغناطیسی درمی‌آید (نقطه a در شکل ۶-۳۱). حال اگر شدت میدان مغناطیسی خارجی به تدریج کاهش یابد، گشتاورهای حوزه‌های مغناطیسی به حالت اولیه خود باز نمی‌گردند و در غیاب میدان مغناطیسی، مغناطیدگی ماده صفر نمی‌شود و به عبارتی ماده از خود پسماند مغناطیسی نشان می‌دهد. در نمودار شکل ۶-۳۱، در نقطه b ماده دارای پسماند (B_r) است. همچنین در نقطه c نیروی وادارنده^{۳۰} مغناطیسی جسم (H_c) وجود دارد که خاصیت مغناطیسی را در جسم حفظ می‌کند. نیروی وادارنده نیرویی است که مانع از غیرمغناطیسی شدن ماده و به حالت اولیه برگشتن آن می‌شود و برای غیرمغناطیسی شدن ماده باید از مبدا تا H_c به ماده میدان مغناطیسی معکوس وارد شود تا ماده غیرمغناطیسی شود.

³⁰ coercive force



شکل ۳۱-۶: منحنی شماتیک هیستریزیس مواد فرومغناطیسی [۱]

در مواد فرومغناطیس نیروی وادارنده مغناطیسی H_C کوچک است؛ به همین دلیل با حذف میدان مغناطیسی خارجی جسم پس از مدت زمان کوتاهی به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. آن بخش از منحنی پسماند را که از نقطه a تا c کشیده شده است منحنی وامغناطیدگی جسم نامیده می‌شود. طبق بررسی‌ها شکل منحنی هیستریزیس با تغییر پارامترهای زیر تغییر می‌کند:

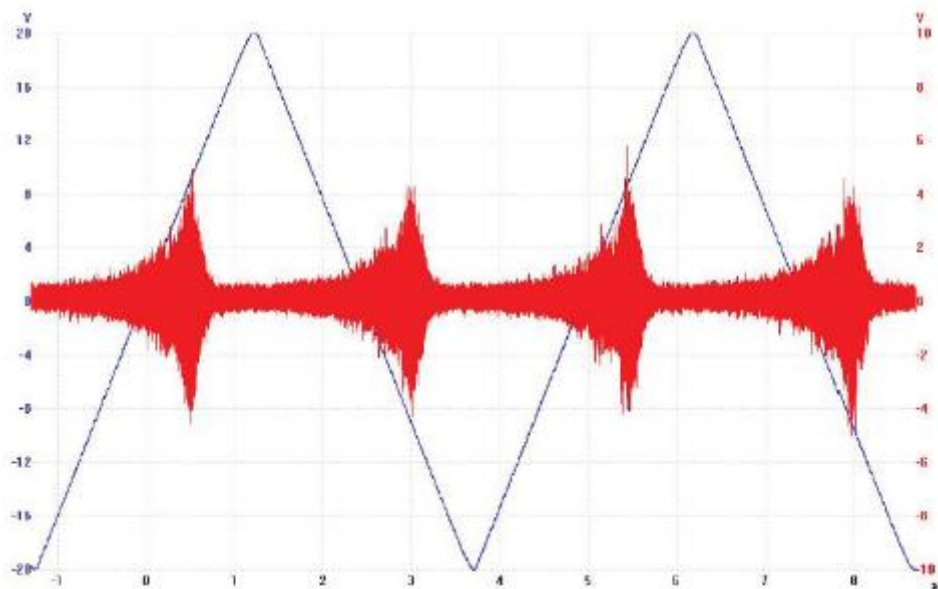
۱. میدان مغناطیسی اعمالی به قطعه
۲. فرکانس مغناطیسی کردن نمونه
۳. دمای نمونه
۴. ترکیب شیمیایی ماده
۵. ریزساختار نمونه
۶. تنش‌های اعمالی به نمونه

اعمال تنش باعث تغییر در پارامترهای پسماند مغناطیسی (Br) و نیروی وادارنده مغناطیسی (H_C) و ویژگی گذردهی ماده خواهد شد. حساسیت نیروی وادارنده مغناطیسی به تنش بسیار کمتر از حساسیت آن به فاکتورهای متالورژیک از جمله اندازه دانه یا توزیع کربن است. همچنین نیروی وادارنده مغناطیسی به حرکت دیواره‌های مغناطیسی، که موانع از حرکت آن‌ها جلوگیری می‌کنند بستگی دارد. از تأثیرپذیری خواص مغناطیسی ماده از تنش برای تخمین تنش موجود استفاده می‌گردد و تکنیک‌های مختلفی در این باره توسعه پیدا کرده است که برخی از این روش‌ها به شرح زیر می‌باشند [۱۱۹]

۱. تکنیک مغناطیسی مگنتوآکوستیکی یا magnetoacoustic emission
۲. روشی بر پایه گذردهی و ناهمسانگردی مغناطیسی یا magnetic anisotropy and permeability system
۳. روش میدان مغناطیسی باقیمانده یا residual magnetic field
۴. روش‌های مگنتوالاستیکی یا magnetoelastic methods
۵. نویز مغناطیسی Barkhausen

۲-۴-۶- نویز Barkhausen

وقتی یک میدان مغناطیسی متغیر به نمونه فرومغناطیسی اعمال می‌شود، توسط نمونه میدان مغناطیسی عکس‌العمل تولید و القاء می‌شود که می‌توان برآیند میدان اعمالی ایجاد شده را در نمودار هیستریزیس قطعه دنبال کرد. در طی چرخه هیستریزیس، تغییرات جزئی در مغناطیسی شدن، در گام‌های مجزایی انجام می‌شود. زمانی که دیواره‌های مغناطیسی تمایل به حرکت دارند (به علت هم جهت شدن حوزه‌های مغناطیسی با میدان خارجی)، بر موانع حرکتی خود غلبه کرده و این گذشتن از موانع سبب ایجاد اثر مغناطیسی پله‌ای در نمونه می‌شود. تغییرات پله‌ای میدان مغناطیسی باعث القای میدان مغناطیسی در کوئل دریافت کننده، که نزدیک سطح نمونه فرومغناطیس قرار دارد، می‌شود. این ولتاژهای پالسی که شبیه به نویز هستند، همان نویز مغناطیسی Barkhausen یا گسیل مغناطیسی Barkhausen می‌باشند که در شکل ۶-۳۲ نمایش داده شده است. نویزهای مغناطیسی Barkhausen در نمودار هیستریزیس وقتی که نمودار 10^5 بار بزرگنمایی می‌شود، قابل مشاهده می‌شوند.



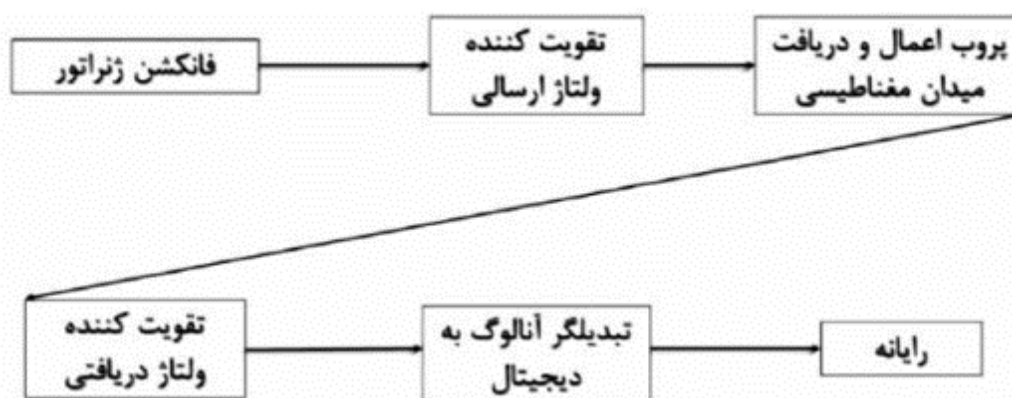
شکل ۶-۳۲: ولتاژهای پالسی حاصل از سیگنال‌های Barkhausen [۱۱۵]

میزان و شدت سیگنال‌های Barkhausen به خواص ماده از جمله ترکیب شیمیایی، ریزساختار و تنش‌های پسماند بستگی دارد. پالس‌های Barkhausen تابعی از میدان مغناطیسی هستند که توسط کوئل دریافت کننده جذب می‌شود. تغییر در مشخصه‌های شکل پروفیل سیگنال Barkhausen مثل تعداد قله‌ها، ارتفاع قله، زمان قله (مکان افقی قله)، سطح زیر نمودار قله و ... نشان دهنده تغییر در مشخصه‌های ماده است. مشخصات دیگر سیگنال Barkhausen مثل مقدار متوسط سیگنال Barkhausen به خواص ماده بستگی دارند. تغییرات خواص مغناطیسی در ماده که با خواص و مشخصه‌های مکانیکی ماده مرتبط هستند، می‌توانند از طریق بررسی و آنالیز سیگنال Barkhausen مشاهده شوند. منظور از خواص ماده، خواصی نظیر درصد آلیاژ، اندازه دانه، چگالی و پیکربندی ناهمگایی‌ها، اندازه و حجم فاز ثانویه، تنش‌های اعمالی و تنش‌های پسماند، تاثیر خزش، تاثیر خستگی و جز این‌ها می‌باشد [۷]. ریزساختار ماده و بافت کریستالی آن روی خواص مغناطیسی تاثیر می‌گذارد. اگر دانه‌ای از یک نمونه دارای ناهمسانگردی بالای متالورژیک باشد، ناهمسانگردی مغناطیسی هم بالا خواهد بود. اگر اندازه‌گیری تنش در محدوده‌ای

است که ناهمسانگردی در آن محدوده بالاست (مثل ورقی که نورد شده، اما بعداً دانه‌بندی آن تغییر نکرده است) باید تأثیر ناشی از این عامل را روی سیگنال Barkhausen جداسازی کرد.

۳-۴-۶- معرفی اجزای سیستم

سیستم اندازه‌گیری نویزهای Barkhausen اصلی شامل یک تولیدکننده تابع جریان می‌باشد که به یک تقویت کننده قدرت متصل است. این سیستم قدرت مورد نیاز را تولید کرده و به سیم پیچ اعمال کننده میدان مغناطیسی منتقل می‌کند. سیم‌پیچ دریافت کننده میدان مغناطیسی به یک تقویت کننده متصل است تا سیگنال Barkhausen را تقویت کند. سیگنال Barkhausen توسط سیم پیچ گیرنده دریافت و بعد از تقویت به رایانه ارسال می‌گردد. پارامترهای مختلف سیگنال Barkhausen از جمله پروفیل سیگنال Barkhausen، ولتاژ کل، ریشه مجموع مجذورات و ... توسط رایانه محاسبه می‌شوند. چیدمان سیستم اندازه‌گیری Barkhausen در شکل ۶-۳۳ نمایش داده شده است. در ادامه بخش های مهم این سیستم به صورت کامل تری معرفی می گردد.



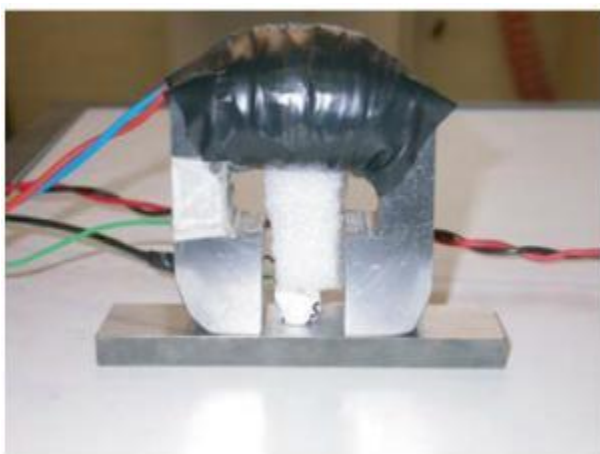
شکل ۶-۳۳: مراحل اندازه‌گیری به روش MBN [۱۱۵]

سیگنال‌های تولیدشده توسط دستگاه تولید جریان، دارای سطح ولتاژ پایینی هستند. به منظور افزایش سطح ولتاژ سیگنال‌ها، از تقویت کننده ولتاژ استفاده می‌شود و سیگنال‌ها پس از تقویت شدن وارد سیم‌های کوئل اعمال میدان مغناطیسی می‌شوند. در انتخاب جریان، باید قدرت میزان میدان اعمالی به قطعه مبنا قرار گیرد و هرچه جریان بالا و فرکانس آن پایین باشد، نفوذ میدان هم بالاتر خواهد بود.

در روش Barkhausen، یک پروب الکترومغناطیسی برای ایجاد و اعمال میدان مغناطیسی و بخشی برای دریافت سیگنال‌های Barkhausen از نمونه به کار می‌رود. همان طور که در شکل ۶-۳۴ و ۶-۳۵ نمایش داده شده است، پروب می‌تواند به شکل U طراحی شده و دارای دو سیم پیچ می‌باشد که هسته‌های آنها از نوع فولاد الکتریکی ورق شکل می‌باشد.



شکل ۳۴-۶: پراب MBN فرکانس بالا، سمت چپ برای سطوح صاف و سمت راست برای سطح چرخنده [۱]



شکل ۳۵-۶: پراب MBN فرکانس پایین، سمت چپ برای سطوح صاف و سمت راست برای سطح چرخنده [۱]

با استفاده از هسته‌های مغناطیسی، نفوذ میدان مغناطیسی به نمونه به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. تعداد دور سیم پیچ و جریان عبوری در پروب الکترومغناطیسی، بستگی به حداکثر قدرت میدان تولید شده دارد. لازم است تعداد دور سیم پیچ و جریان عبوری، به صورت مناسبی انتخاب شود. تعداد دور زیاد و جریان بالا در سیم پیچ میدان قوی‌تری تولید می‌کند و مقدار اشباع در منحنی هیستریزس بالا می‌رود، اما از طرفی نیروی الکترومغناطیسی بزرگی تولید می‌شود که با میدان اعمالی به نمونه، به خصوص در فرکانس‌های بالا، مخالفت می‌کند. میدان مغناطیسی پر قدرت با نفوذ بالا فقط در فرکانس کم اتفاق می‌افتد. همچنین تعداد دورهای سیم پیچ در کویل دریافت کننده سیگنال Barkhausen در حساسیت و فرکانس پاسخ تأثیر دارد. افزایش تعداد دور سیم پیچ‌ها سبب افزایش حساسیت سیستم به تغییرات تنش می‌شود. اگر تعداد دور خیلی کم باشد، دریافت سیگنال Barkhausen از عمق‌های زیاد امکانپذیر نیست. در برخی موارد در روش Barkhausen فرکانس بالا از فرکانس بالا برای تولید میدان مغناطیسی استفاده می‌شود (فرکانس بالاتر از ۵۰ هرتز). به این ترتیب نرخ مغناطیسی شدن در نمونه و در نهایت اندازه ولتاژ و تراز اعمالی در کویل دریافت کننده بالاست. همچنین فرکانس سیگنال Barkhausen، که با فرکانس سیگنال اعمالی رابطه مستقیم دارد، بالا خواهد بود. بنابراین سیگنال Barkhausen که فرکانس پایینی دارد، به راحتی با کویل با تعداد دور کم قابل آشکارسازی است. اکثر سیگنال‌های Barkhausen تولید شده در نمونه‌ها در محدوده فرکانس پایین (زیر ۵۰

کیلوهرتز) هستند، به همین دلیل اکثر کویل‌های دریافت کننده باید فرکانس پایین باشند و تعداد دورهای زیادی داشته باشند. همچنین برای دریافت سیگنال‌های بارک هاوزن از عمق‌های زیاد باید از تعداد دورهای بالا استفاده کرد. در نتیجه کویل دریافت کننده فرکانس پایین از کویل دریافت کننده فرکانس بالا بزرگتر خواهد بود. با استفاده از سیم‌های مسی نازک می‌توان کویل‌های دور بالا با اندازه کوچک ساخت که حساسیت آنها بالا باشد. پروب با استفاده از سیم‌هایی به تقویت کننده ولتاژ ارسالی و تقویت کننده ولتاژ دریافتی وصل شده است. سیگنال‌های Barkhausen دریافت شده بسیار ضعیف هستند و قابلیت خوانده شدن و آنالیز را ندارند و لازم است به منظور افزایش سطح ولتاژ این سیگنال‌ها، تقویت کننده ولتاژ در مدار قرار داده شود.

۵-۶- عمق اندازه گیری و دقت اندازه گیری

فرکانس تولیدی میدان مغناطیسی اعمالی تأثیر زیادی بر نفوذ میدان در قطعه دارد. در سیستم Barkhausen با فرکانس‌های بالا، قدرت میدان مغناطیسی تولید شده کم است، به همین دلیل اندازه پروب را می‌توان کوچک انتخاب کرد. دقت در اندازه‌گیری Barkhausen به اندازه پراب نیز بستگی دارد. در حالتی که فرکانس ولتاژ اعمالی بالاست، اندازه پراب الکترومغناطیسی هم نسبت به حالت فرکانس پایین کوچک و عمق اندازه‌گیری کم است. مطالعات نشان می‌دهد که سیگنال Barkhausen از موارد دیگری از جمله فرکانس تحریک میدان اعمالی به نمونه، اندازه و شکل نمونه، نوع و شکل پراب الکترومغناطیسی حساسیت کویل مغناطیسی دریافت کننده، انتخاب گستره فرکانسی سیگنال دریافتی از نمونه و جز این‌ها تأثیر می‌پذیرد. تاکنون هیچ روشی برای تعیین عمق اندازه‌گیری و اندازه گیری تغییرات تنش در عمق مورد نظر ارائه نشده و پژوهش‌ها اغلب به صورت تجربی و مقایسه‌ای می‌باشند

۷- فصل هفتم: تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند در داخل و خارج از کشور

۷-۱- مقدمه

در این فصل تجهیزات تجاری شده اندازه‌گیری تنش پسماند و همچنین قابلیت‌های دانشگاه‌های کشور در اندازه‌گیری تنش پسماند تشریح شده است. لازم به ذکر است که ممکن است دانشگاه‌ها و اساتید دیگری نیز در داخل کشور در زمینه اندازه‌گیری تنش پسماند فعالیت‌هایی انجام داده باشند که در این فصل ذکر نشده باشد. از آنجایی که عموماً در وب سایت‌های دانشگاه‌های ایران، اطلاعات محدودی از فعالیت‌های اساتید و دانشگاه انتشار می‌یابد، غالب مطالب گردآوری شده در زمینه توانایی‌های داخلی، مرتبط با شناخت مدیر پروژه از اساتید فعال در زمینه اندازه‌گیری تنش پسماند بوده است.

۷-۲- تجهیزات تجاری اندازه‌گیری تنش پسماند

در بین بیش از ۱۰ روش اصلی اندازه‌گیری تنش پسماند، برای برخی از آنها تجهیزات اندازه‌گیری به صورت تجاری تولید می‌شوند. برای برخی از روش‌های مهم باید از ابزارهای دیگر استفاده کرد (برای نمونه در روش کانتور نیاز به EDM و CMM است) و یا آنها را ساخت.

۷-۲-۱- دستگاه‌های پرتابل X-ray

در گذشته تمام دستگاه‌های اندازه‌گیری تنش پسماند با روش اشعه ایکس به صورت آزمایشگاهی بود و به همین جهت امکان استفاده از این دستگاه‌ها برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در سایت وجود نداشت. اما امروزه شرکت‌های بسیاری اقدام به تولید دستگاه‌های اشعه ایکس با قابلیت حمل و نصب روی قطعات مختلف کرده‌اند. برای نمونه در شکل ۷-۱ یک نمونه دستگاه X-ray که روی یک محور نصب شده است، نمایش داده شده است.



شکل ۷-۱: دستگاه XRD پرتابل برای اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله‌ها

شرکت PULSTEC اقدام به ساخت یک دستگاه پرتابل X-ray با نام تجاری μ -X360 نموده است (شکل ۷-۲) که در یک چمدان جای گرفته و وزن تمام ملحقات آن در حدود ۶ کیلوگرم است. با استفاده از این دستگاه به راحتی می‌توان تنش‌های پسماند در قطعات بزرگ و کوچک را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۷-۳ برخی از کاربردهای این دستگاه نمایش داده شده است



شکل ۷-۲: دستگاه پرتابل X-ray شرکت PULSTEC با نام تجاری μ -X360



شکل ۷-۳: کاربرد دستگاه پرتابل شرکت PULSTEC در اندازه‌گیری تنش پسماند برای قطعات مختلف

شرکت MRX نیز یک دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند ربائیک با اشعه X-ray تولید کرده است که در شکل زیر نمایش داده شده است. این دستگاه در سه سایز مختلف تولید می‌شود که در شکل ۷-۴ به تصویر درآمده است. در شکل ۷-۵ نیز یک نمونه از دستگاه‌های شرکت Protoxrd نشان داده شده است.



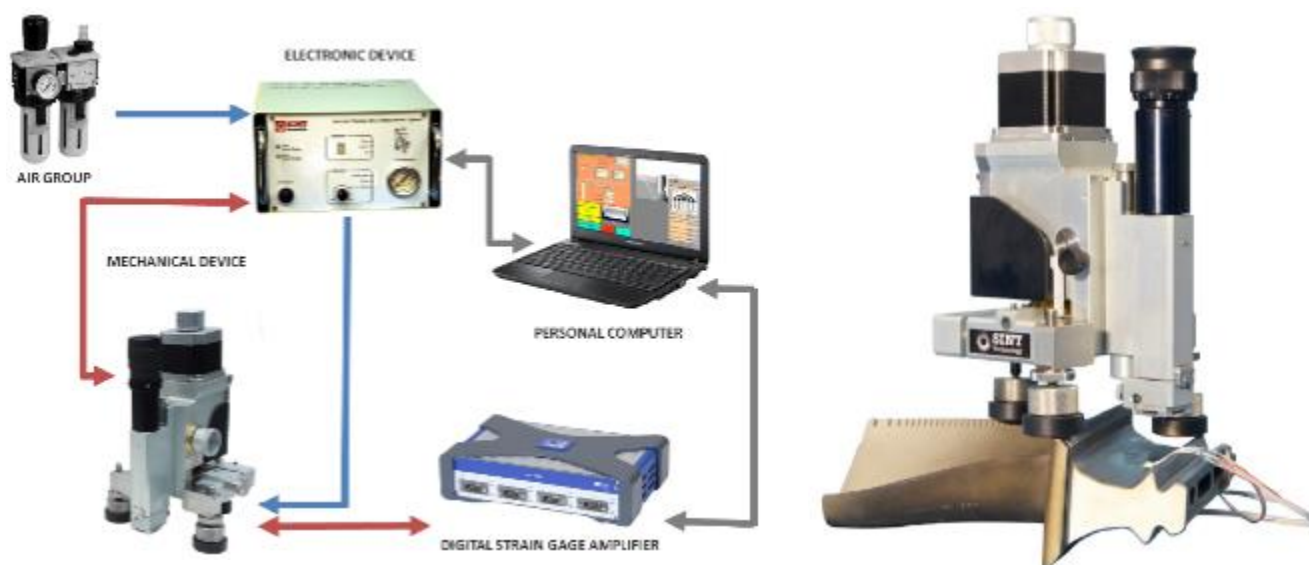
شکل ۴-۷: دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند XRD رباتیک شرکت MRX



شکل ۵-۷: دستگاه پرتابل XRD شرکت Protoxrd

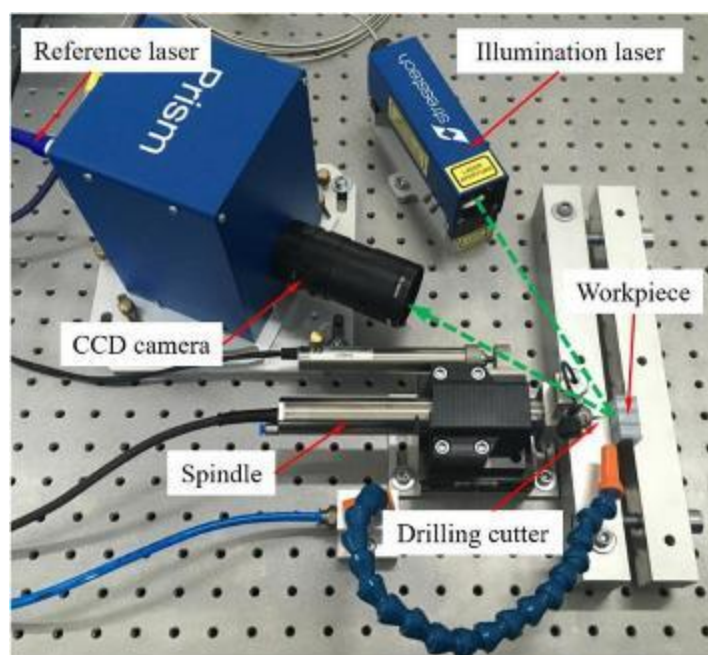
۷-۲-۲- دستگاه سوراخکاری مرکزی

هم اکنون شرکت‌های زیادی دستگاه سوراخکاری مرکزی را تولید می‌کنند. در شکل ۶-۷ دستگاه شرکت MTS با نام تجاری MTS3000-restan نمایش داده شده است. در این شکل طریقه استفاده از این دستگاه برای اندازه‌گیری تنش پسماند در پره توربین گاز آورده شده است.



شکل ۶-۷: دستگاه MTS3000-restan شرکت MTS، اندازه‌گیری تنش پسماند پره توربین گاز

شرکت Stresstech نیز با استفاده از اشعه لیزر و روش ESPI³¹ اقدام به اندازه‌گیری کرنش‌ها در روش سوراخکاری مرکزی کرده و از کرنش‌سنج استفاده نمی‌کند. تجهیزات این روش و نور لیزر تابانده شده به محل سوراخکاری را می‌توان در شکل ۷-۷ مشاهده کرد.

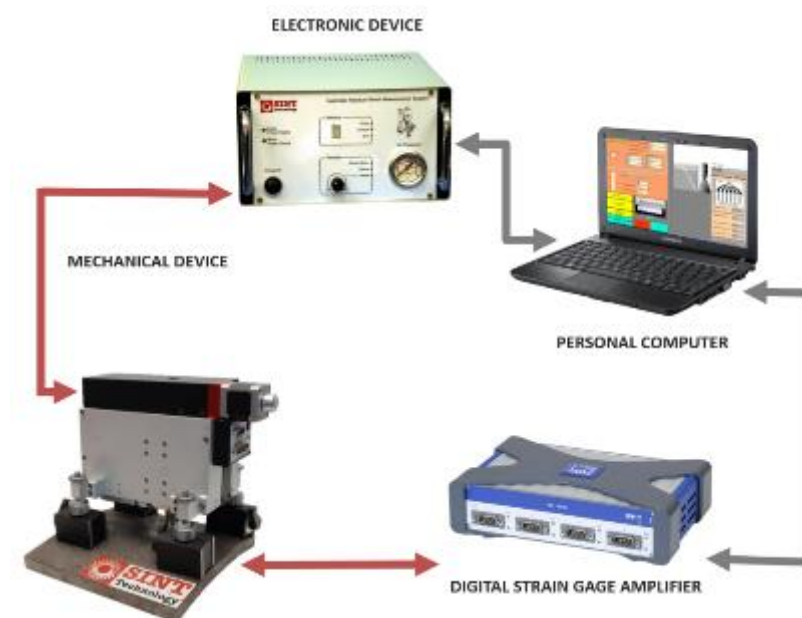


شکل ۷-۷: تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی شرکت Stresstech به همراه تجهیزات ESPI

³¹ electronic speckle pattern interferometry

۷-۲-۳- دستگاه Ring-Core

دستگاه MTS3000-ringcore شرکت MTS هم اکنون بالاترین قابلیت را در بین دستگاه‌های اندازه‌گیری تنش پسماند با روش ring core دارد. در شکل ۷-۸ اجزای این دستگاه و همچنین در شکل ۷-۹ یک نمونه از برش ایجاد شده روی یک لوله نمایش داده شده است.



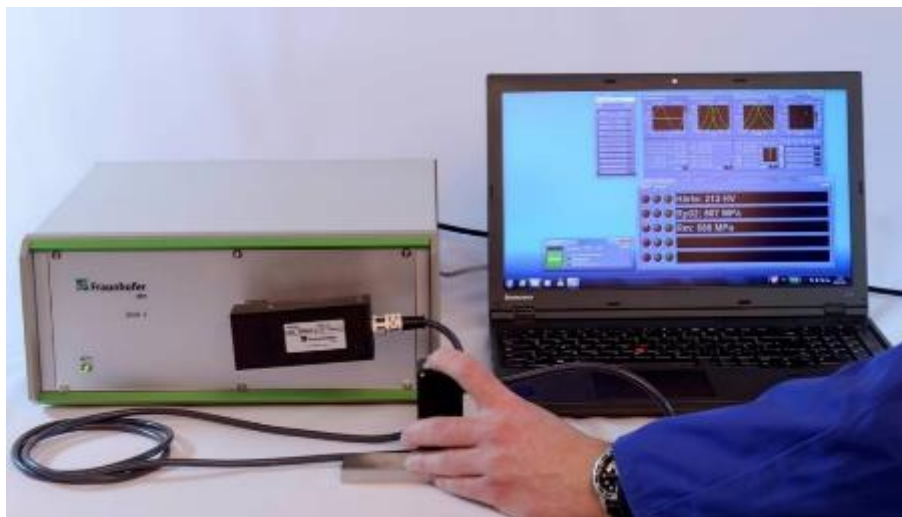
شکل ۷-۸: اجزای دستگاه MTS3000-ringcore شرکت MTS



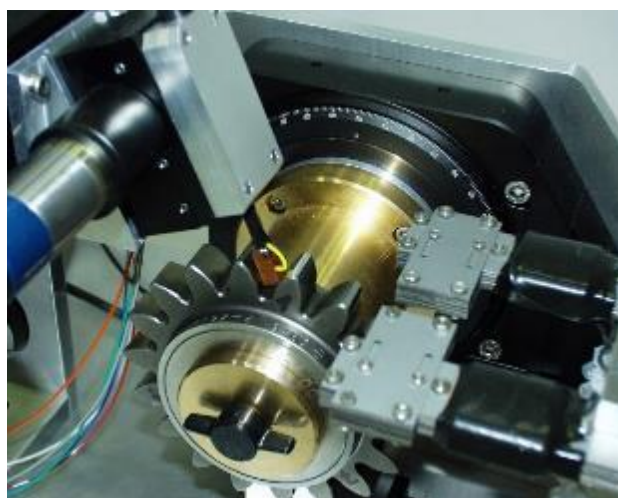
شکل ۷-۹: یک نمونه از برش ایجاد شده روی یک لوله توسط MTS3000-ringcore

۷-۲-۴- دستگاه میدان مغناطیسی

تا کنون یک دستگاه در این زمینه تجاری سازی شده است که 3MA micro magnetic نام دارد و توسط انستیتو Fraunhofer آلمان ساخته شده است. در شکل ۷-۱۰ نمایی از دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند و در شکل ۷-۱۱ چند کاربرد این دستگاه برای اندازه‌گیری تنش پسماند تصویر شده است.



شکل ۷-۱۰: دستگاه 3MA micro magnetic برای اندازه‌گیری تنش پسماند با روش میدان مغناطیسی



شکل ۷-۱۱: کاربرد دستگاه 3MA micro magnetic برای اندازه‌گیری تنش پسماند

۷-۳- امکانات اندازه‌گیری تنش پسماند در کشور

تاکنون در هیچ کدام از تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند، شاهد تولید دستگاه و یا قطعات مصرفی به صورت تجاری در کشور نیستیم. هم اکنون در دانشگاه‌های امیرکبیر تهران، دانشگاه تهران، دانشگاه شریف، دانشگاه بوعلی سینا همدان و دانشگاه زنجان هسته‌های تخصصی اندازه‌گیری تنش پسماند شکل گرفته است. البته در دانشگاه‌های دیگری نیز فعالیت‌هایی آغاز شده است.

۱-۳-۷- روش اشعه ایکس

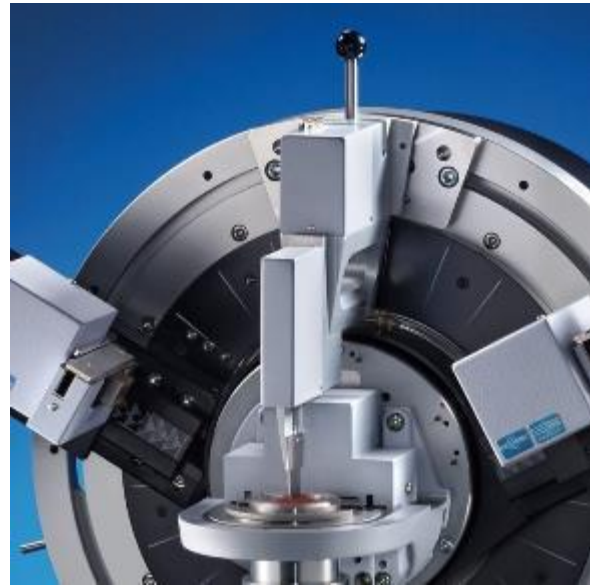
دستگاه EQUINOX3000 ساخت کشور فرانسه که در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه امیرکبیر قرار دارد، توانایی اندازه‌گیری تنش پسماند با دقت مناسبی را دارد. این آزمایشگاه در سال ۱۳۹۰ راه اندازی شده است (شکل ۷-۱۲). این دستگاه یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین نوع دستگاه‌های پراش پرتو ایکس محسوب می‌شود، زیرا در ساخت آن از آشکارسازهای نوع جدید مکان ثابت CPS نوع ۱۲۰ (دارای انحنای ۱۲۰ درجه و به شعاع انحنای ۲۵۰ میلی متر) استفاده شده است که سرعت و دقت کار را افزایش داده است. در مرجع [۱۲۰] تنش‌های پسماند نمونه با ابعاد ۱۵۰*۱۰۰*۸ میلیمتر توسط این دستگاه اندازه‌گیری شده است.



شکل ۷-۱۲: دستگاه EQUINOX3000 دانشگاه امیرکبیر

در سال ۱۳۹۷ نیز دانشکده مواد دانشگاه علم و صنعت اقدام به خرید یک دستگاه XRD از شرکت BRUKER آلمان (شکل ۷-۱۳) کرده است که یکی از مدرنترین دستگاه‌های XRD حال حاضر جهان است. این دستگاه نیز قادر به اندازه‌گیری تنش پسماند است.

در دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس نیز دستگاه XRD ساخت شرکت فیلیپس هلند (شکل ۷-۱۴) بعضاً برای اندازه‌گیری تنش پسماند خدمات ارائه می‌دهد. هر چند که سابقاً مقادیر به دست آمده توسط این دستگاه دقت بالایی نداشتند. شرکت نقش پراش صنعتی اصفهان که در دانشگاه صنعتی اصفهان قرار دارد، دارای دستگاه X-ray با قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند است. حداکثر قطر نمونه باید کمتر از ۳۰ mm باشد. مشخصات دستگاه مذکور در سایت شرکت ذکر نشده است.



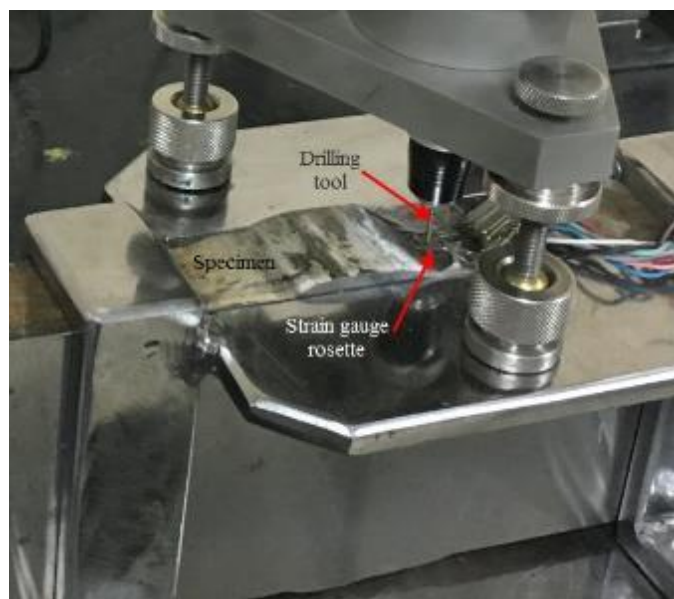
شکل ۱۳-۷: نمایی از دستگاه XRD دانشگاه علم و صنعت



شکل ۱۴-۷: نمایی از دستگاه XRD دانشگاه تربیت مدرس

۲-۳-۷- سوراخکاری مرکزی

این روش، قدیمی‌ترین روشی است که در ایران مورد استفاده قرار گرفته است. دکتر فرهی و دکتر ستاری فر اولین اساتیدی بودند که به صورت تخصصی با استفاده از این روش تنشهای پسماند ساچمه زنی و جوش (به ترتیب) را اندازه‌گیری نمودند. هم‌اکنون دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر، دانشگاه بوعلی سینا همدان، دانشگاه تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران (دستگاه با دقت پایین) و دانشگاه زنجان دستگاه‌های اندازه‌گیری تنش پسماند با روش سوراخکاری مرکزی را در اختیار دارند و ارائه خدمت می‌کنند. در شکل ۱۵-۷ تصویری از دستگاه مورد استفاده در دانشگاه بوعلی سینا همدان نمایش داده شده است. تمام اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایران با استفاده از کرنش سنج است.



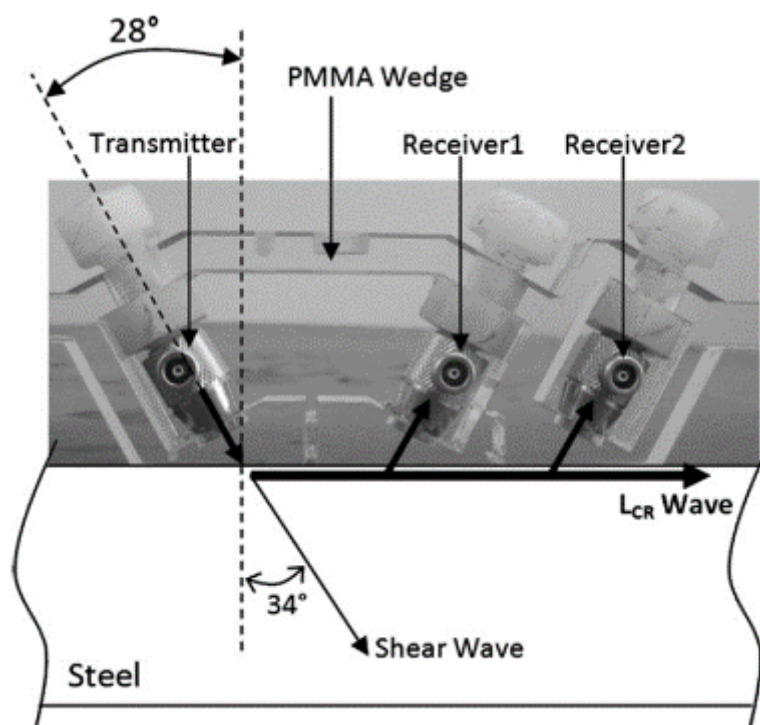
شکل ۷-۱۵: دستگاه سوراخکاری مورد استفاده در دانشگاه بوعلی سینا همدان

۷-۳-۳- روش آلتراسونیک

در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه امیرکبیر تجهیزات بسیار خوبی برای اندازه‌گیری تنش پسماند با روش آلتراسونیک ساخته شده است. در شکل ۷-۱۶ تجهیز طراحی شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله‌ها و در شکل ۷-۱۷ تجهیز مربوط به اندازه‌گیری تنش پسماند با روش آلتراسونیک برای صفحات نمایش داده شده است.



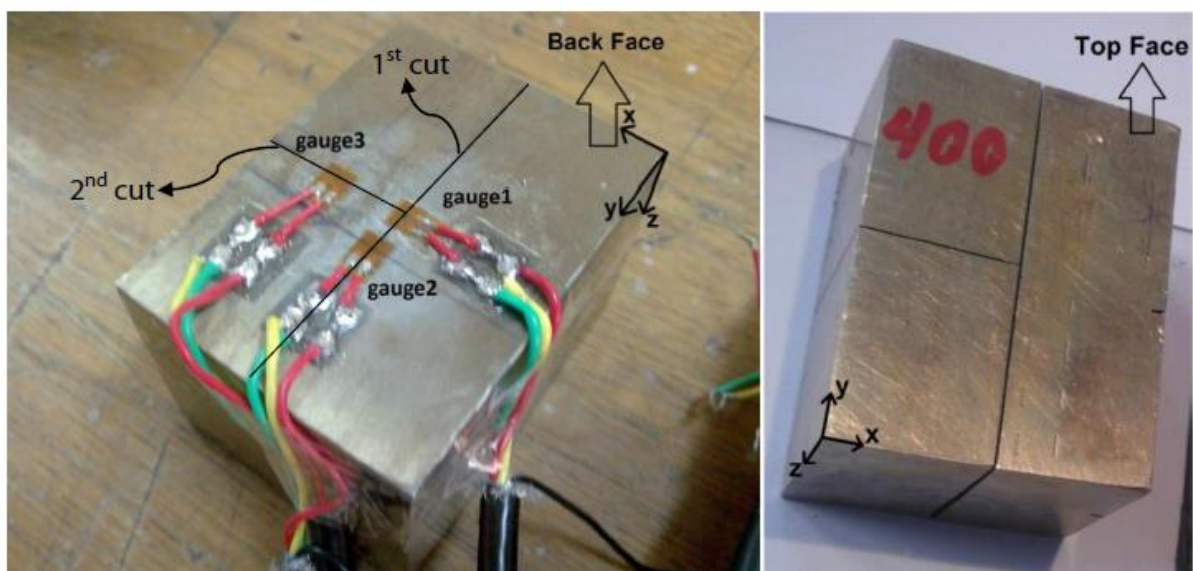
شکل ۷-۱۶: تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند به روش آلتراسونیک در لوله‌ها، دانشگاه امیرکبیر [۱۲۱]



شکل ۷-۱۷: تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند به روش آلتراسونیک در صفحات، دانشگاه امیرکبیر [۱۲۲]

۷-۳-۴- روش Slitting

در دانشگاه بوعلی سینا همدان و تحت هدایت دکتر محمودی، با استفاده از روش Slitting تنش‌های پسماند محاسبه شده است. در شکل ۷-۱۸، اندازه‌گیری و برش انجام شده نمایش داده شده است.



شکل ۷-۱۸: انجام Slitting برای اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق و در دو جهت در دانشگاه بوعلی سینا همدان [۱۲۳]

۵-۳-۷- روش میدان مغناطیسی

دکتر محرمی در دانشکده مکانیک دانشگاه زنجان تلاش‌های اولیه خوبی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با استفاده از روش میدان مغناطیسی و نویز Barkausen انجام داده‌اند. در شکل ۷-۱۹ تجهیز آماده شده برای انجام این آزمایش نمایش داده شده است.



شکل ۷-۱۹: پروب فرسوده و گیرنده ساخته شده برای روش اندازه‌گیری نویز مغناطیسی در دانشگاه زنجان [۱۲۴]

۸- فصل هشتم: تعیین روش‌های مناسب اعمال تنش پسماند،
تنش‌زدایی و اندازه‌گیری تنش پسماند

۸-۱- مقدمه

در این فصل قصد داریم که معایب و مزایای هر کدام از روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، تنش زدایی و اعمال تنش پسماند برای کاربرد در صنعت نیروگاهی و با توجه به امکانات کشور را مورد بررسی قرار دهیم.

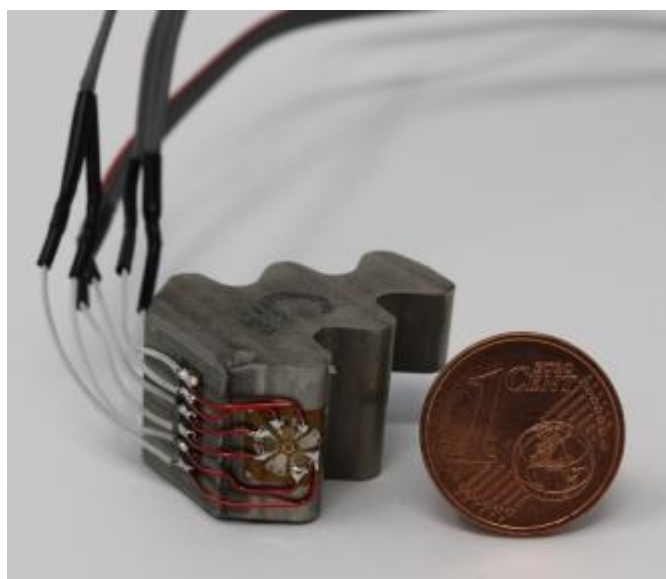
۸-۲- روش‌های مناسب اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات نیروگاهی

منبع اصلی ایجاد تنش پسماند در قطعات نیروگاهی، فرایند جوشکاری و لایه‌نشانی است که هر دو سبب ایجاد تنش‌های پسماند با مقادیر بسیار بالا می‌شوند. همچنین بسیاری از قطعات در حین ساخت، تنش‌های پسماند در آنها باقی می‌ماند که لازم است یا تنش‌گیری شوند و یا بار کمتری به آنها وارد شود. در برخی از کاربردها نیز تنش پسماند فشاری جهت افزایش عمر خستگی به قطعات اعمال می‌شود که مهمترین آنها فرایند ساچمه‌زنی پره‌های توربین بخار و عملیات LPB روی پره‌های توربین گاز است. در ادامه روش‌های مناسب اندازه‌گیری تنش پسماند با توجه به امکانات موجود در کشور تشریح می‌شود.

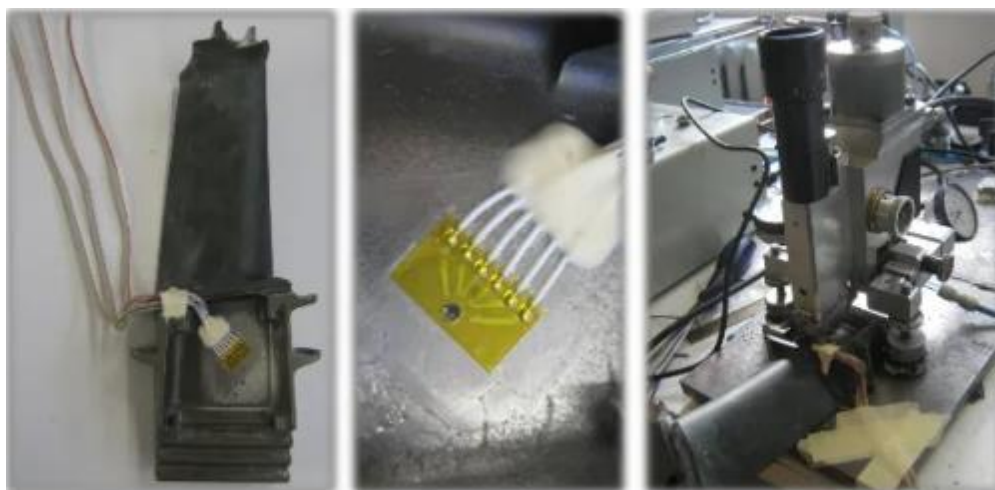
۸-۲-۱- روش سوراخکاری مرکزی

این روش بیشترین کاربرد را در اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات نیروگاهی دارد زیرا عمده تنش‌های پسماند ایجاد شده در قطعات نیروگاهی از نوع تنش‌های سطحی هستند. برای نمونه در فرایند ساچمه‌زنی، عمق تنش پسماند 0.25 mm است که به خوبی می‌توان با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی، تنش پسماند را اندازه‌گیری کرد. میتوان با استفاده از EDM قطعه را برید و سپس با استفاده از سوراخکاری مرکزی تنش‌های پسماند را اندازه‌گیری کرد. این کار برای اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره‌های توربین گاز به سبب مسطح نبودن و عدم امکان ایجاد سوراخ ضروری می‌باشد. در شکل ۸-۱ یک نمونه از اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین گاز نمایش داده شده است. برای سطوح دیگر پره، معمولاً نیازی به برش نیست. برای نمونه در شکل ۸-۲ اندازه‌گیری تنش پسماند روی خود پره صورت گرفته است.

روش سوراخکاری مرکزی، جزو روش‌های نیمه مخرب اندازه‌گیری تنش طبقه‌بندی می‌شود. خرابی ایجاد شده در قطعه بسیار کم بوده و می‌توان با پر کردن سوراخ ریز ایجاد شده، از قطعه با اطمینان کامل استفاده کرد. این خاصیت برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات بزرگ بسیار اهمیت دارد. برای نمونه در شکل زیر، با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی تنش‌های پسماند در روتور یک توربین نیروگاهی اندازه‌گیری شده است. تنها روش مخرب و نیمه مخربی که می‌توان با آن تنش پسماند را در روتور اندازه‌گیری کرد، روش سوراخکاری مرکزی است.



شکل ۱-۸: اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین گاز با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی



شکل ۲-۸: اندازه‌گیری تنش پسماند در پره توربین



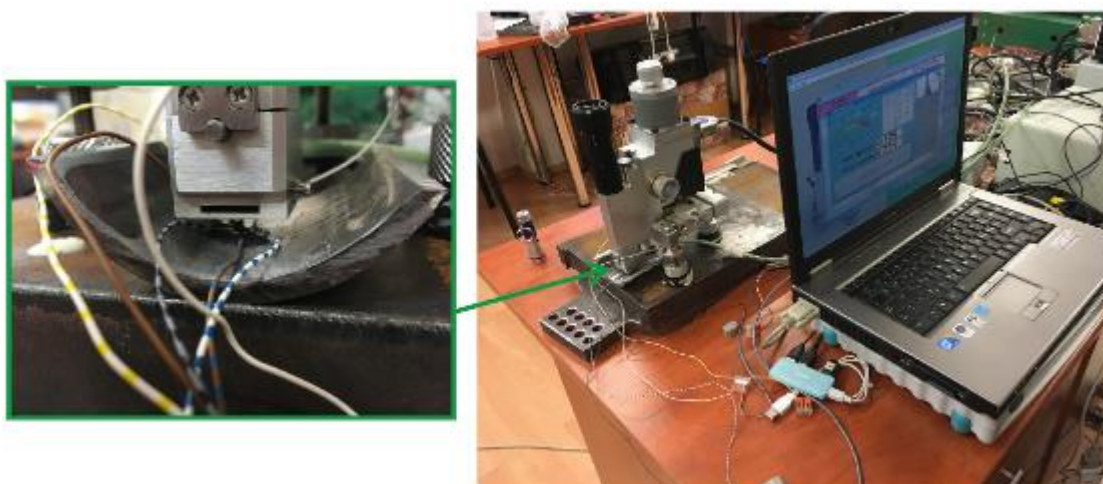
شکل ۳-۸: اندازه‌گیری تنش پسماند در روتور یک واحد نیروگاهی

همچنین می‌توان با طراحی و تنظیم پایه‌ها، دستگاه سوراخکاری مرکزی را روی لوله‌ها قرار داد و تنش‌های پسماند را اندازه‌گیری نمود. برای نمونه در شکل زیر تنش‌های پسماند در جوش یک لوله با روش سوراخکاری مرکزی سنجیده شده است.



شکل ۴-۸: اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در جوش یک لوله با روش سوراخکاری مرکزی

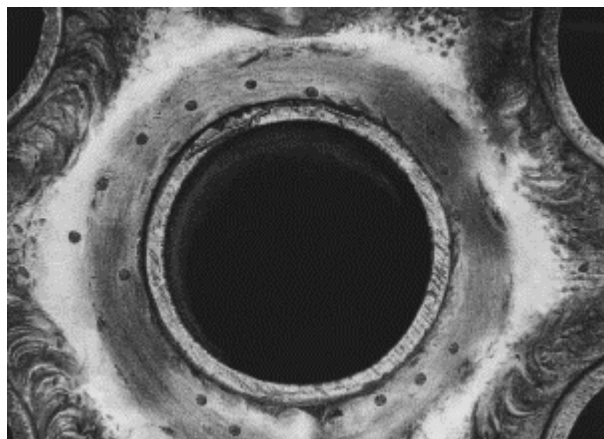
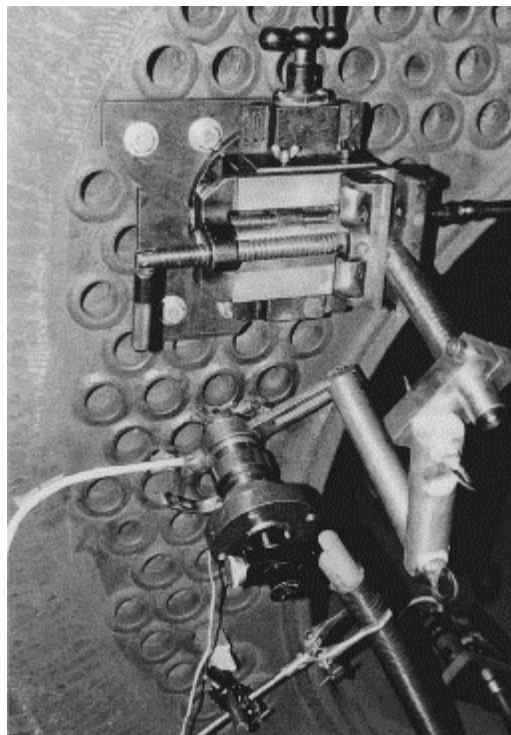
در شکل ۵-۸ نیز طریقه اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله بویلر آسیب دیده نمایش داده شده است. برای این منظور از روش سوراخکاری مرکزی استفاده شده است.



شکل ۵-۸: تجهیزات سوراخکاری مرکزی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله آسیب دیده بویلر [۹۹]

مهمترین ویژگی دستگاه سوراخکاری مرکزی، پرتابل بودن آن و امکان استفاده از آن در سایت است. این امر سبب شده است که بتوان از روش سوراخکاری مرکزی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات بزرگ بهره برد. یکی از نواحی حساس در مبدل‌های حرارتی که معمولاً خرابی‌های بسیاری در آن مشاهده می‌شود، اتصال لوله به تیوب‌شیت است. در شکل ۶-۸ طریقه اندازه‌گیری تنش پسماند با روش سوراخکاری مرکزی روی صفحه تیوب‌شیت مبدل حرارتی نمایش داده شده است. همچنین

اثرات برجای مانده از این روش در این شکل کاملاً قابل مشاهده است. می‌توان با سنگ زدن و یا با پر کردن سوراخ با جوش، اثر ایجاد شده را حذف نمود.

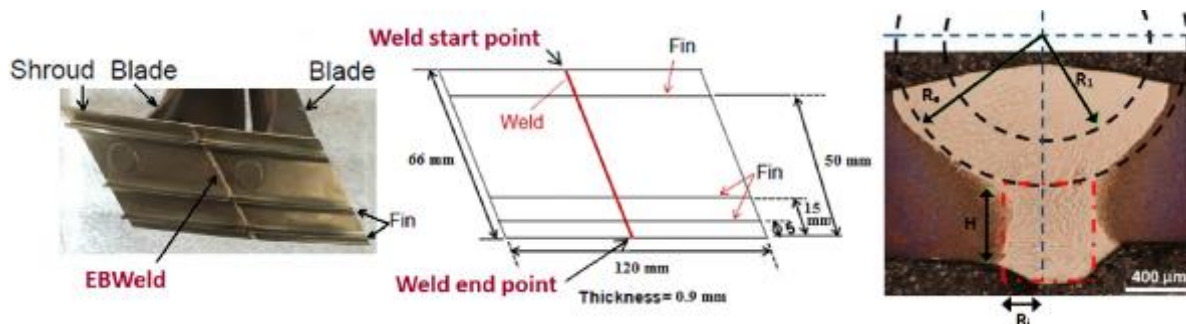


تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی (در محل)

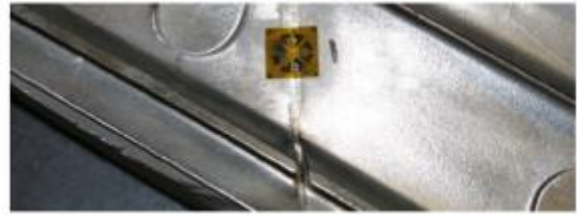
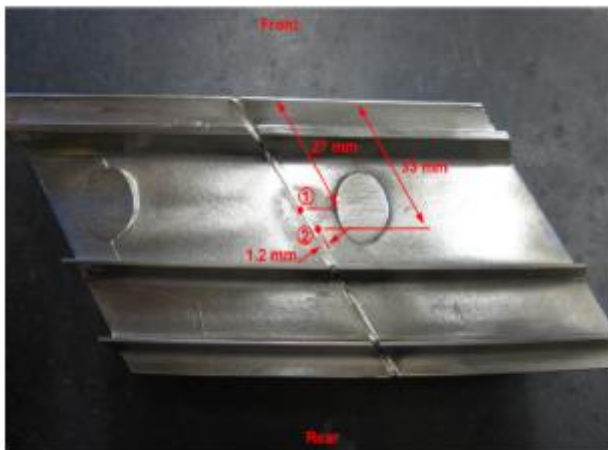
نقاط اندازه‌گیری تنش پسماند

شکل ۶-۸: تجهیزات روش سوراخکاری مرکزی و نقاط اندازه‌گیری تنش پسماند در بویلر [۹۵]

در برخی از پره‌های توربین گاز، بخش شروود پره که از Inconel ساخته شده، به یکدیگر جوش می‌شوند. در شکل ۷-۸ یک نمونه از این جوش‌ها آورده شده است. در شکل ۸-۸ نیز محل اندازه‌گیری تنش پسماند در سمت چپ و در سمت راست دو موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها نمایش داده شده است. یکی از کرنش‌سنج‌ها روی خط جوش و دیگری در فاصله ۱/۲ mm از مرکز خط جوش قرار داده شده است و به کمک روش سوراخکاری مرکزی تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده‌اند.



شکل ۷-۸: هندسه بخش جوشکاری شده و گرده جوش شروود پره توربین گاز [۹۰]

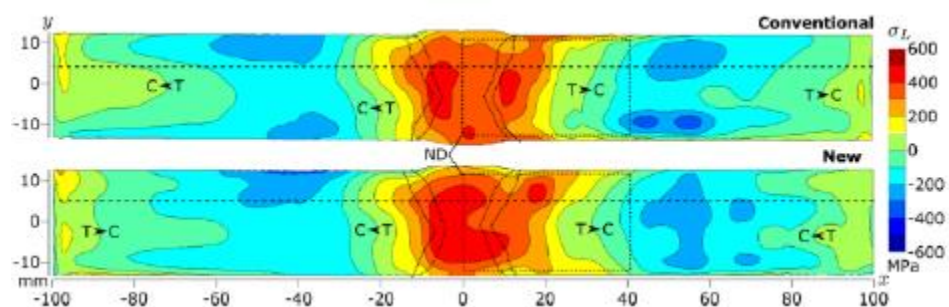
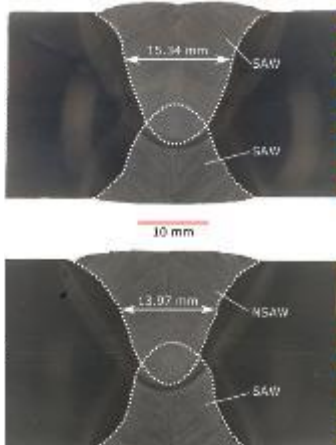


شکل ۸-۸: راست: دو موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها، چپ: محل اندازه‌گیری تنش پسماند [۹۰]

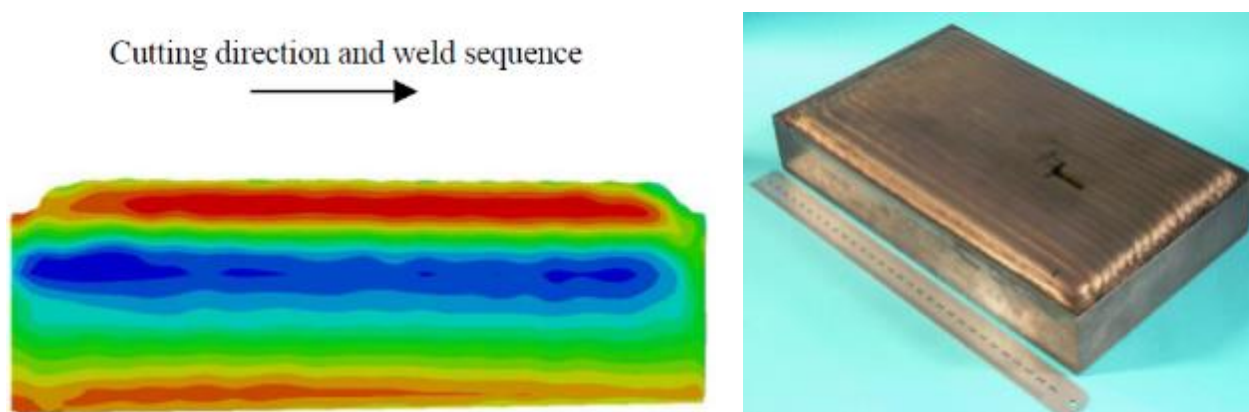
با به توجه تصاویر ۱-۸ الی ۸-۸ کاملاً مشخص است که میتوان از روش روش سوراخکاری مرکزی برای اکثر قطعات نیروگاهی بهره برد. تجهیزات این روش پرتابل، ساده و سبک بوده و امکان نصب روی اکثر سطوح را دارند. از طرفی دیگر اثر برجا مانده بسیار جزئی بوده و با سنگ زنی و یا با جوشکاری برطرف می‌شود. البته این روش را نمیتوان برای اندازه‌گیری تنش پسماند روی لبه‌ها، سطوح ناهموار و یا داخل شیارها استفاده کرد.

۸-۲-۲- روش کانتور

روش کانتور یک روش کاملاً مخرب است و به همین جهت قابلیت اعمال روی سازه اصلی را ندارد. از طرفی نمیتوان با این روش تنش‌های پسماند در سطح را اندازه‌گیری کرد. با این حال، این روش یک مزیت قابل توجه دارد و آن امکان اندازه‌گیری تنش در یک صفحه است. در کاربردهای نیروگاهی، برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری میتوان از روش کانتور استفاده کرد. همچنین میتوان با این روش تنش پسماند ناشی از فرایند Cladding را اندازه‌گیری نمود. در شکل زیر یک نمونه از اندازه‌گیری تنش پسماند در جوش با استفاده از روش کانتور آورده شده است. در شکل ۸-۱۰ نیز یک نمونه از کاربرد روش کانتور در اندازه‌گیری تنش پسماند ناشی از فرایند Cladding تصویر شده است.



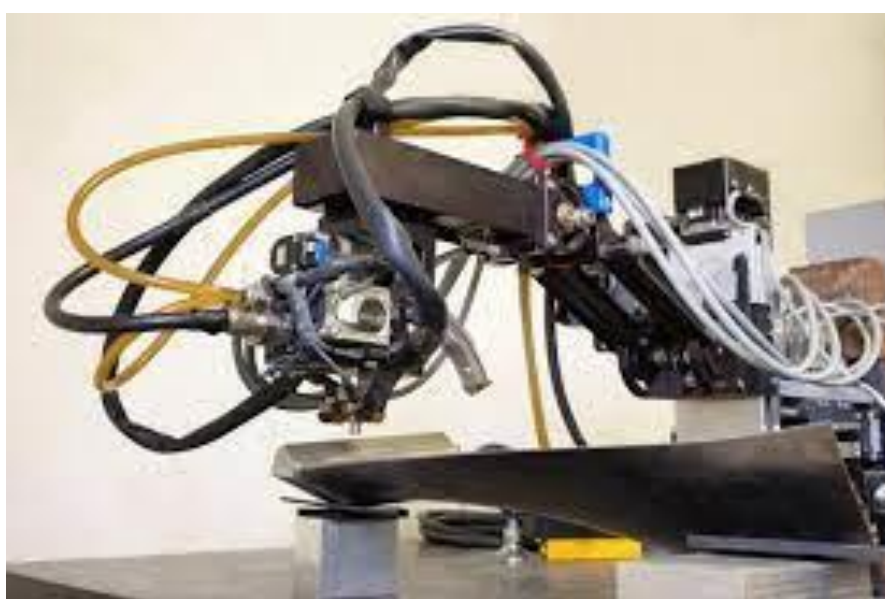
شکل ۸-۹: یک نمونه از اندازه‌گیری تنش پسماند در جوش با استفاده از روش کانتور [۱۲۵]



شکل ۸-۱۰: راست: هندسه نمونه لایه نشانی شده چپ: طریقه فیکس کردن برای برش WEDM [۱۰۴]

۳-۲-۸- پراش اشعه ایکس

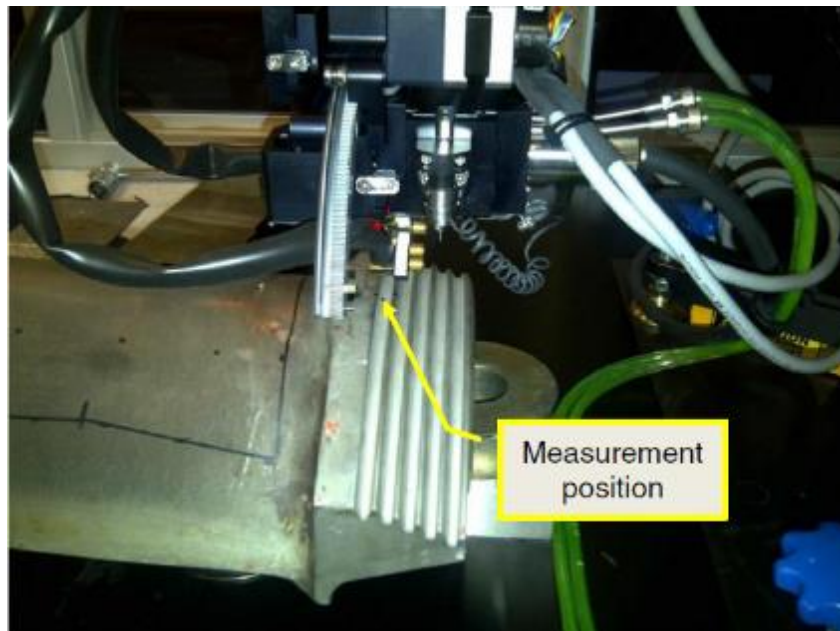
در بین روش‌های مبتنی بر پراش، این روش ارزاترین روش اندازه‌گیری تنش پسماند است. روش‌های غیر مخرب دیگری مانند روش آلتراسونیک و روش میدان مغناطیسی، هزینه کمتری نسبت به این روش دارند اما این روش‌ها هنوز به بلوغ کامل نرسیده و تنش‌های اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها دقت مناسب نداشته و در بسیاری از موارد، نیاز به اصلاح دارند. هم‌اکنون نوع پرتابل دستگاه XRD برای اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح جهان تجاری شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما هنوز این دستگاه وارد کشور نشده و اندازه‌گیری تنش پسماند با روش XRD محدود به دستگاه‌های تعبیه شده در دانشگاه‌های کشور است که عموماً محدودیت ابعاد دارند و تنها نمونه‌های با ابعاد کوچک را می‌توان در داخل دستگاه قرار داد (این دستگاه‌ها ذاتاً برای اندازه‌گیری خواص مواد هستند و اندازه‌گیری تنش پسماند یک فعالیت جانبی آنها است). یک نمونه اندازه‌گیری تنش پسماند در پره توربین توسط دستگاه XRD در شکل ۸-۱۱ نمایش داده شده است. در شکل ۸-۱۲ نیز اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین بخار با استفاده از دستگاه X-Ray نمایش داده شده است.



شکل ۸-۱۱: یک نمونه اندازه‌گیری تنش پسماند در پره توربین توسط دستگاه XRD

استفاده از این روش در صنایع نیروگاهی چند محدودیت عمده دارد:

- ۱- برای پره‌های توربین گاز که عموماً از تک کریستال ساخته می‌شوند، کاربرد ندارد. زیرا روش‌های مبتنی بر پراش، تنها برای پلی کریستال‌ها قابل اعمال است.
- ۲- عمق اندازه‌گیری تنش پسماند بسیار محدود بوده و تنها $30\mu\text{m}$ است.
- ۳- بایستی پرداخت بسیار دقیقی روی سطح انجام شود و در غیر این صورت نتایج کاملاً اشتباه خواهند بود.
- ۴- با توجه به محدودیت ابعاد دستگاه، تنها قطعات کوچک را می‌توان اندازه‌گیری کرد.



شکل ۸-۱۲: اندازه‌گیری تنش پسماند در ریشه پره توربین بخار با استفاده از دستگاه X-Ray [۸۴]

با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، امکان استفاده از این روش کم بوده و بیشتر معطوف به اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت تحقیقاتی برای قطعات صنعت نیروگاهی می‌شود. همچنین به دلیل دقت بالای این روش، می‌توان از آن برای صحت‌گذاری نتایج به دست آمده توسط روش‌های دیگر استفاده کرد (در نمونه‌های با ابعاد کوچک).

۸-۲-۴- روش‌های دیگر اندازه‌گیری تنش پسماند

روش‌های دیگر اندازه‌گیری تنش پسماند مانند روش آلتراسونیک، روش میدان مغناطیسی، روش slitting و غیره علی‌رغم پیشرفت‌هایی که در آن‌ها اتفاق افتاده است هنوز به پختگی کامل نرسیده و نیاز به تجربه و مهارت زیادی برای تحلیل نتایج است. به بیانی دیگر دقت نتایج بسیار وابسته به تجربه فرد، هندسه قطعه، مقادیر تنش پسماند، جنس قطعه، طریقه تفسیر نتایج، فیلتر کردن نتایج و غیره دارد و به همین جهت هنوز منابع خطا نسبتاً زیاد هستند. با بررسی‌های انجام شده، تاکنون در صنایع نیروگاهی از این روش‌ها استفاده نشده است. هر چند که امید می‌رود در آینده نزدیک، تحقیقات بیشتری در این روش‌ها صورت پذیرد و کارایی آن‌ها بهبود یابد.

۳-۸- روش‌های اعمال تنش پسماند فشاری

در فاز یک پروژه، روش‌های اعمال تنش پسماند فشاری مورد بررسی قرار گرفتند. روش‌های مطالعه شده به شرح زیر می‌باشند.

- ساچمه زنی
- لیزرپینینگ
- غلتک کاری
- Ultrasonic surface rolling process (USRP)
- ساچمه زنی آلتراسونیک
- Low-plasticity burnishing (LPB)
- آلتراسونیک پینینگ
- Cavitation peening

هم اکنون بسیاری از این روش‌ها در صنایع نیروگاهی در کشورهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از این روش‌ها عمر نسبتاً کوتاهی دارند اما به دلیل قابلیت‌های زیادی که دارند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. همان طور که در گزارش فاز اول ذکر شد، در صنایع نیروگاهی عموماً قطعات در دمای بالا کار می‌کنند و به همین جهت آسایش تنش‌های پسماند تحت اثر دما از مسائل بسیار مهم در این صنعت می‌باشد. به بیان ساده‌تر علی‌رغم ایجاد تنش پسماند فشاری با روش‌هایی مانند ساچمه‌زنی، پس از مدت کوتاهی که قطعه تحت بار خستگی در دمای بالا قرار می‌گیرد، تنش‌های پسماند فشاری آزاد شده و عملاً کارایی بسیار کمی خواهند داشت. حتی میتوان گفت که برخی از روش‌هایی که در چند سال اخیر ابداع شده‌اند جهت رفع این نقص در اعمال تنش‌های پسماند فشاری بوده‌اند. در بین روش‌هایی که در دمای بالا نیز کارایی خوبی دارند می‌توان از دو روش لیزرپینینگ و LPB نام برد. متأسفانه هیچ کدام از این دو روش در کشور به صورت صنعتی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و نیاز است که با انجام تحقیقات بیشتر و سرمایه گذاری مناسب، مقدمات ساخت یا خرید تجهیزات مربوطه صورت پذیرد. لازم به ذکر است که فرایند LPB به طور خاص برای کاربردهای مرتبط با توربین‌های گاز توسعه یافت و در صورت استفاده از آن، عمر خستگی پره‌های توربین گاز افزایش چشمگیری خواهد داشت. همچنین به دلیل کار سختی پائینی که این روش دارد، آسایش تنش حرارتی در این روش بسیار محدود بوده و بخش بسیار زیادی از تنش‌های پسماند ایجاد شده در دمای بالا حفظ می‌شوند.

۹- فصل نهم: نتیجه گیری

۹-۱- مقدمه

نتایج فاز دو گزارش پروژه "بررسی روشهای نوین اندازه گیری تنش پسماند در قطعات نیروگاهی" و همچنین نتایج کلی پروژه در این فصل ذکر خواهد شد. فاز اول پروژه اختصاص به مرور مقالات و گزارشات و جمع آوری اطلاعات لازم در رابطه با روشهای اعمال تنش پسماند، تنش زدایی و اندازه گیری تنش پسماند داشت. در فاز دوم در رابطه با سه روش کانتور، سوراخکاری مرکزی و میدان مغناطیسی اطلاعات جامع تری ارائه شد. این سه روش هزینه پایینی داشته و اجرای آن در پژوهشگاه نیرو نیز در صورت تامین منابع، امکان پذیر خواهد بود. سپس لیست کامل تجهیزات اندازه گیری تنش پسماند تجاری شده در سطح جهان و همچنین قابلیت های مراکز دانشگاهی کشور در اندازه گیری تنش پسماند به تفصیل ارائه شد. مزایا و معایب روش های مختلف اندازه گیری تنش پسماند در صنعت نیروگاهی و همچنین آینده روش های اندازه گیری تنش های پسماند از دیگر مواردی بود که در فاز دوم مورد بررسی قرار گرفت.

۹-۲- موارد بررسی شده

در دو فاز پروژه، مواد متعددی از جمله روش های اندازه گیری تنش پسماند، روش های ایجاد تنش پسماند فشاری، روش های تنش زدایی، مرور ادبیات تنش های پسماند در کاربرد نیروگاهی، روش های قابل توسعه در پژوهشگاه نیرو، امکانات کشور در حوزه اندازه گیری تنش پسماند، موارد استفاده از روش های اندازه گیری تنش پسماند در صنعت نیروگاهی و آینده پژوهی تنش پسماند مورد بررسی قرار گرفت. در شکل زیر، فلوچارت موارد بررسی شده در فاز یک آورده شده است.



شکل ۹-۱: موارد بررسی شده در فاز یک پروژه

۹-۳- توسعه فناوری در کشور

به سبب محدودیت های و کمبودهای بسیار زیاد در تجهیزات اندازه گیری تنش پسماند و نبود متخصصین کافی در صنعت، اندازه گیری تنش پسماند در کشور تا حدود زیادی مغفول مانده است که همین امر سبب بروز خرابی های زیادی در صنعت شده است. هم اکنون تنها در محیط دانشگاهی به مبحث اندازه گیری تنش پسماند پرداخته شده است و متأسفانه در دانشگاه ها نیز، تجهیزات مناسب وجود ندارد. این در حالی است که بسیاری از روش های مخرب و نیمه مخرب اندازه گیری تنش پسماند، تجهیزات پیشرفته لازم نداشته و امکان توسعه فناوری در کشور برای آنها کاملاً وجود دارد. در روش های مبتنی بر پراش، به دلیل تکنولوژی بالا نیازی به توسعه فناوری نیست و تنها بایستی تکنولوژی وارد کشور شود. روش های غیر مخرب دیگر مانند روش آلتراسونیک و روش میدان مغناطیسی نیز هزینه ساخت تجهیزات بسیار پایینی داشته و میتوان با سرمایه گذاری در آنها، هم توسعه دانش و هم توسعه فناوری داشت.

۹-۴- توسعه فناوری در پژوهشگاه نیرو

با توجه به محدودیت منابع در پژوهشگاه نیرو و از آنجایی که پژوهشگاه نیرو هیچ سابقه ای در زمینه اندازه گیری تنش پسماند ندارد، بهتر است که در روش هایی مانند سوراخکاری مرکزی که به صورت گسترده در دانشگاه ها استفاده می شود، سرمایه گذاری نشود و تمرکز بر توسعه روش های غیر مخرب که مبتنی بر پراش نیستند صورت پذیرد. به خصوص روش میدان مغناطیسی که متخصصین زیادی در پژوهشگاه به مباحث فنی آن تسلط دارند و می توان با هزینه نسبتاً پایین هم توسعه دانش و هم توسعه فناوری ایجاد کرد. در روش هایی مانند سوراخکاری مرکزی به دلیل گستره وسیع استفاده از آن، پژوهشگاه نیرو می تواند نقش مشاور و ناظر بین دانشگاه و صنعت را ایفا نماید.

1. Schajer, G.S., *Practical Residual Stress Measurement Methods*. 2013: Wiley Online Books.
2. G. Totten, M. Howes, and T. Inoue, *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. 2002: ASM International.
3. <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/centre-hole-drilling>. 2021.
4. *ASTM E837 - 20, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. 2020, ASTM International.
5. <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/deep-hole-drilling>. 2021.
6. <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/ring-coring>. 2021.
7. Sachs, G., *Nachweis innerer spannungen in stange und rohren*. Zitschrift fur Metalkunde, 1927. **19**: p. 352–357.
8. A. A. Garcia-Granada, D. J. Smith, and M.J. Pavier, *A new procedure based on sachs boring for measuring non-axisymmetric residual stresses*. International J. of Mechanical Sciences, 2000. **42**: p. 1027–1047.
9. <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/sachs-boring>. 2021.
10. Prime. MB and Gonzales. AR, *The Contour Method: Simple 2-D Mapping of Residual stresses*, in *The 6th International Conference on Residual Stresses*,. 2000: London, UK.
11. Prime. MB, *Cross-sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour After a Cut*. Journal of Engineering Materials and Technology 2001. **123**(2): p. 162–168.
12. <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/contour>. 2021.
13. <https://www.stressmap.co.uk/contour-method/>. 2021.
14. <https://www.stressmap.co.uk/x-ray-diffraction-for-measuring-residual-stress/>. 2021.
15. <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/x-ray-diffraction>. 2021.
16. <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/neutron-diffraction>. 2021.
17. <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/ultrasound>. 2021.

۱۸. آ.سلیمیان، ا. فروزمهر، م. بدرسمای، بررسی تجربی فرآیند لیزر شک پینینگ با استفاده از لیزرهای کم انرژی برای ایجاد تنش پسماند فشاری، اولین کنفرانس بین‌المللی انجمن پیشران‌ها هوافضایی ایران. ۱۳۹۳.

19. J. Z. Lu, et al., *Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts*. Acta Mater, 2010. **58**(11): p. 3984–3994,.
20. J. Z. Lu, et al., *Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel*. 2010. **58**: p. 5354–5362.
21. Y. Hu and Z. Yao, *Overlapping rate effect on laser shock processing of 1045 steel by small spots with Nd:YAG pulsed laser*. Surf Coatings Technol, 2008. **202**(8): p. 1517-1525.
22. J. Z. Lu, et al., *Effects of laser peening on stress corrosion cracking (SCC) of ANSI 304 austenitic stainless steel*. Corrosion Science, 2012. **60**: p. 145-152.
23. Cozzolino, L.D., et al., *Investigation of post-weld rolling methods to reduce residual stress and distortion*. Journal of Materials Processing Technology, 2017. **247**: p. 243-256.
24. Coules, H.E., et al., *Effect of high pressure rolling on weld-induced residual stresses*. Science and Technology of Welding and Joining, 2012. **17**(5): p. 394-401.
25. Wong, C.C., A. Hartawan, and W.K. Teo, *Deep Cold Rolling of Features on Aero-Engine Components*. Procedia CIRP, 2014. **13**: p. 350-354.
26. Nalla, R.K., et al., *On the influence of mechanical surface treatments—deep rolling and laser shock peening—on the fatigue behavior of Ti–6Al–4V at ambient and elevated temperatures*. Materials Science and Engineering: A, 2003. **355**(1): p. 216-230.
27. Zhang, Q., et al., *Microstructure and surface properties of 17-4PH stainless steel by ultrasonic surface rolling technology*. Surface and Coatings Technology, 2017. **321**: p. 64-73.
28. Ye, Y., et al., *Nanocrystallization and enhanced surface mechanical properties of commercial pure titanium by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling*. Materials & Design, 2018. **149**: p. 214-227.
29. Kattoura, M., et al., *Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on elevated temperature residual stress, microstructure, and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy*. International Journal of Fatigue, 2018. **110**: p. 186-196.
30. Kattoura, M., et al., *Effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2018. **711**: p. 364-377.
31. Yasuoka, M., et al., *Improvement of the fatigue strength of SUS304 austenite stainless steel using ultrasonic nanocrystal surface modification*. Surface and Coatings Technology, 2013. **218**: p. 93-98.

32. Liu, C., et al., *On the influence of ultrasonic surface rolling process on surface integrity and fatigue performance of Ti-6Al-4V alloy*. Surface and Coatings Technology, 2019. **370**: p. 24-34.
33. Badreddine, J., et al., *CAD based model of ultrasonic shot peening for complex industrial parts*. Advances in Engineering Software, 2014. **76**: p. 31-42.
34. Todaka, Y., M. Umemoto, and K. Tsuchiya, *Comparison of Nanocrystalline Surface Layer in Steels Formed by Air Blast and Ultrasonic Shot Peening*. MATERIALS TRANSACTIONS, 2004. **45**(2): p. 376-379.
35. Chaise, T., et al., *Modelling of multiple impacts for the prediction of distortions and residual stresses induced by ultrasonic shot peening (USP)*. Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(10): p. 2080-2090.
36. Manchoul, S., et al., *Comparison between conventional shot peening and ultrasonic shot peening*. Mechanics & Industry, 2018. **19**(6).
37. Liu, G., J. Lu, and K. Lu, *Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening*. Materials Science and Engineering: A, 2000. **286**(1): p. 91-95.
38. Pandey, V., et al., *Role of ultrasonic shot peening on low cycle fatigue behavior of 7075 aluminium alloy*. International Journal of Fatigue, 2017. **103**: p. 426-435.
39. Olugbade, T.O. and J. Lu, *Literature review on the mechanical properties of materials after surface mechanical attrition treatment (SMAT)*. Nano Materials Science, 2020. **2**(1): p. 3-31.
40. <https://www.lambdatechs.com/low-plasticity-burnishing-lpb/>. 2021.
41. Paul S. Prev  y, N. Jayaraman, and John Cammett, *Overview of low plasticity burnishing for mitigation of fatigue damage mechanisms*, in *Proceedings of ICSP 9*. 2005: Paris.
42. Chan, K.S., et al., *Residual stress profiles for mitigating fretting fatigue in gas turbine engine disks*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(5): p. 815-823.
43. <https://www.lambdatechs.com/controlled-plasticity-burnishing/>. 2021.
44. Malaki, M. and H. Ding, *A review of ultrasonic peening treatment*. Materials & Design, 2015. **87**: p. 1072-1086.
45. G.I. Prokopenko, O.I.K., J.I. Kleiman, P.P. Micheev, V.V. Knysh, Y.F. Kudryavtsev, *Device for ultrasonic peening of metals*, in *US Patent*.
46. Y. Kudryavtsev, J.K., A. Lugovskoy, G. Prokopenko, *Fatigue Life Improvement of Tubular Welded Joints by Ultrasonic Peening*. International Institute of Welding, 2006. **(IIW Document XIII-2117-06, 24 pp.)**.
47. A. Abdullah, M.M., A. Eskandari, *Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening*. Mater. Des, 2012. **38**: p. 7-18.

48. E.S. Statnikov, V.O.M., A. Blomqvist, C, *omparison of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) and Other Fatigue Life Improvement Methods*. Weld. World, 2002. **46**(3-4): p. 20-32.
49. <https://www.powermag.com/ultra-high-pressure-cavitation-peening-offers-new-way-maintain-components-operational-nuclear-reactors/>. 2021.
50. Alberg, H. and D. Berglund, *Comparison of plastic, viscoplastic, and creep models when modelling welding and stress relief heat treatment*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003. **192**(49): p. 5189-5208.
51. Munsi, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *Modification of welding stresses by flexural vibration during welding*. Science and Technology of Welding and Joining, 2001. **6**(3): p. 133-138.
52. ASME B31.3, *Process Piping*, . 2014, The American Society of Mechanical Engineers.
53. *BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1*., 2015, The American Society of Mechanical Engineers.
54. *AWS D1.1 Structural Welding - Steel* 2015, American Welding Society.
55. R. I. Stephens, A. Fatemi, and R. R. Stephnes, *Metal Fatigue in Engineering*. 2 ed. 2001: John Wiley& Sons.
56. Rao, D., et al., *The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress*. International Journal of Fatigue, 2007. **29**(1): p. 192-196.
57. Munsi, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *Modification of residual stress by post-weld vibration*. Materials Science and Technology, 2001. **17**(5): p. 601-605.
58. Munsi, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *Vibratory stress relief—an investigation of the torsional stress effect in welded shafts*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2001. **36**(5): p. 453-464.
59. Munsi, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *The effect of vibratory stress on the welding microstructure and residual stress distribution*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2001. **215**(2): p. 99-111.
60. Kwofie, S., *Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief*. Materials Science and Engineering: A, 2009. **516**(1): p. 154-161.
61. T. Lv and Y. Zhang, *A combined method of thermal and vibratory stress relief*., Journal of Vibroengineering, 2015. **17**(6).
62. H.J. Gao, et al., *Experimental Investigation on the Fatigue Life of Ti-6Al-4V Treated by Vibratory Stress Relief*. Metals 2017. **7**: p. 158.
63. Gao, H., et al., *Fatigue life of 7075-T651 aluminium alloy treated with vibratory stress relief*. International Journal of Fatigue, 2018. **108**: p. 62-67.

64. G. S. Crisi and D. P. Mendonca, *Stress relief of welds by heat Treatment and vibration: A comparison between the two methods*. 2006: www.vsrtechnology.net/wp-content/uploads/crisi_mendonca.pdf.
65. Kalpana, J. and P. Rao, *Effect of vibratory welding process on hardness of dissimilar welded joints*. Engineering Solid Mechanics, 2017. 5(2): p. 133-138.
66. Lu, Q., L. Chen, and C. Ni, *Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning*. Materials Science and Engineering: A, 2007. 457(1): p. 246-253.
67. B. V. Suresh, et al., *Influence of vibratory weld conditioning on hardness of lap welded joints*. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2017. 8(1): p. 169–177.
68. Zhu, Z., L. Chen, and D. Rao, *Relieving welding residual stress by applying vibratory weld Conditioning*. Materials Science Forum, 2005. 490-491: p. 475-480.
69. I Samardžić, et al., *Influence of vibrations on residual stresses distribution in welded joints*,. Metalurgija, 2015. 54(3): p. 527-530.
70. Sun, M.C., Y.H. Sun, and R.K. Wang, *Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel*. Materials Letters, 2004. 58(7): p. 1396-1399.
71. F. Tatar, A.H. Mahmoudi, and A. Shooshtari, *Vibratory stress relief of welded austenite stainless steel plates: a numerical and experimental approach*,. Iranian Journal of Materials Forming 2021. 8(1): p. 50-64.
72. Hai Gong, Yanjie Sun, and e.a. Yaoqiong Liu, *Effect of Vibration Stress Relief on the Shape Stability of Aluminum Alloy 7075 Thin-Walled Parts*. Metals 2019. 27.
73. S. Jafari Mehrabadi, M. Azizmoradi, and M.M. Emami, *stress relief and material properties improvement through vibration vs. common thermal method*. Journal of Solid Mechanics 2012. 4(2): p. 170-176.
74. Kuang, L., *Finite Element Prediction of Residual Stress Relief in a Two-Dimensional Cantilever Beam*, in Alfred University. 2002.
75. Yang, Y.P., *Understanding of Vibration Stress Relief with Computation Modeling*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009. 18(7): p. 856-862.
76. Zhao, X.C., et al., *Simulation of vibration stress relief after welding based on FEM*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2008. 21(4): p. 289-294.
77. Rogante, M., et al., *High-resolution diffraction for residual stress determination in the NiCrMoV wheel of an axial compressor for a heavy-duty gas turbine*. Physica B: Condensed Matter, 2004. 350(1, Supplement): p. E479-E481.
78. Kawamura, T., et al., *A Residual Stress Measurement Technique for Turbine Blade Dovetails*. 2011. p. 69-76.
79. Sundar, R., et al., *Laser shock peening of steam turbine blade for enhanced service life*. Pramana, 2014. 82(2): p. 347-351.

80. C. Polese, M. Newby, and D. Glaser, *Synchrotron XRD Evaluation of Residual Stresses Introduced by Laser Shock Peening for Steam Turbine Blade Applications*, in *9th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutron and Synchrotron Radiation*. 2018: South Africa. p. 97-102.
81. Tan, L., et al., *Effect of welding residual stress on operating stress of nuclear turbine low pressure rotor*. Nuclear Engineering and Technology, 2020. **52**(8): p. 1862-1870.
82. Pierret, S., et al., *Combining neutron diffraction and imaging for residual strain measurements in a single crystal turbine blade*. NDT & E International, 2012. **45**(1): p. 39-45.
83. J. R. Barton and F.N. Kusenberger, *Residual Stresses in Gas Turbine Engine Components from Barkhausen Noise Analysis*. Journal of Engineering for Power, 1974. **96**(4): p. 349-357
84. Newby, M., M.N. James, and D.G. Hattingh, *Finite element modelling of residual stresses in shot-peened steam turbine blades*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014. **37**(7): p. 707-716.
85. James, M.N., et al., *Shot-peening of steam turbine blades: Residual stresses and their modification by fatigue cycling*. Procedia Engineering, 2010. **2**(1): p. 441-451.
86. Chen, J., et al., *An experimental and numerical analysis of residual stresses in a TIG weldment of a single crystal nickel-base superalloy*. Journal of Manufacturing Processes, 2020. **53**: p. 190-200.
۸۷. ع.ش. نبی، شبیه سازی کانتورهای دمایی و تنش، کرنش های پسماند ناشی از جوشکاری پره های ا. محمدی، ب.ع. خزائی. سمپوزیم فولاد. ۱۳۹۳، ردیف آخر توربین بخار کم فشار به روش اجزا محدود.
88. James, M.N., et al., *Residual stresses in condition monitoring and repair of thermal power generation components*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017. **92**: p. 289-297.
89. James, M.N., et al., *Applications of Residual Stress in Combatting Fatigue and Fracture*. Procedia Structural Integrity, 2016. **2**: p. 11-25.
90. Bonakdar, A., et al., *Finite element modeling of the electron beam welding of Inconel-713LC gas turbine blades*. Journal of Manufacturing Processes, 2017. **26**: p. 339-354.
91. Kurai, J., et al. *Monitoring of Stress-Strain State of Boiler During Pessure Test*. in *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures*. 2006. Dordrecht: Springer Netherlands.
92. Ficquet, X., et al., *Measurement of Residual Stresses in Large Industrial Components Using the Deep Hole Drilling Technique*. 2005. p. 861-865.
93. Yildirim, B. and H.F. Nied, *Residual Stresses and Distortion in Boiler Tube Panels With Welded Overlay Cladding*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2004. **126**(4): p. 426-431.

94. Citirik, E., *Three-Dimensional Fracture Analysis of Circumferentially Cracked Boiler Tubes*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012. **134**(3).
95. Tait, R.B. and J. Press, *An experimental study of the residual stresses, and their alleviation, in tube to tube-sheet welds of industrial boilers*. Engineering Failure Analysis, 2001. **8**(1): p. 15-27.
96. Daryoush Danyali and Eslam Ranjbarnodeh, *Numerical and experimental investigation of the effect of hydrostatic pressure on the residual stress in boiler-tube welds*. Materials and technology, 2016. **50**(5): p. 775-782.
97. Lee, H.-s., et al., *Failure analysis on welded joints of 347H austenitic boiler tubes*. Engineering Failure Analysis, 2015. **57**: p. 413-422.
98. Kim, W., et al., *Welding residual stress analysis of 347H austenitic stainless steel boiler tubes using experimental and numerical approaches*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016. **30**(4): p. 1773-1779.
99. Pástor, M., et al., *Prediction of failures in steam boiler using quantification of residual stresses*. Engineering Failure Analysis, 2020. **118**: p. 104808.
100. P. Prev  y, D. Hornbach, and P. Mason, *Thermal residual stress relaxation and distortion in surface enhanced gas turbine engine components*, in *17th Heat Treating Society Conference*. 1998, ASM.
101. Hosseinzadeh, F., J. Kowal, and P.J. Bouchard, *Towards good practice guidelines for the contour method of residual stress measurement*. The Journal of Engineering, 2014. **2014**(8): p. 453-468.
102. Hosseinzadeh, F. and P.J. Bouchard, *Mapping Multiple Components of the Stress Tensor Using the Contour Method*. Materials Science Forum, 2014. **768-769**: p. 87-94.
103. Traor  , Y., F. Hosseinzadeh, and P.J. Bouchard, *Plasticity in the Contour Method of Residual Stress Measurement*. Advanced Materials Research, 2014. **996**: p. 337-342.
104. Naveed, N., F. Hosseinzadeh, and J. Kowal, *Residual stress measurement in a stainless steel clad ferritic plate using the contour method*, in *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. 2013: Paris.
105. Jacob, A., et al., *Residual stress measurements in offshore wind monopile weldments using neutron diffraction technique and contour method*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018. **96**: p. 418-427.
106. Wan, Y., et al., *Weld residual stresses in a thick plate considering back chipping: Neutron diffraction, contour method and finite element simulation study*. Materials Science and Engineering: A, 2017. **699**: p. 62-70.
107. Kartal, M., et al., *Residual Stress Measurements in Single and Multi-Pass Groove Weld Specimens Using Neutron Diffraction and the Contour Method*. Materials Science Forum, 2006. **524-525**: p. 671-676.

108. Shi, L., A.H. Price, and W.N. Hung, *Use of Contour Method for Welding Residual Stress Assessment*. Procedia Manufacturing, 2018. **26**: p. 276-285.
109. Pu Xie, H.-Y.Z.B.W.S.-L.G., *Using Finite Element and Contour Method to Evaluate Residual Stress in Thick Ti-6Al-4V Alloy Welded by Electron Beam Welding*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2015. **28**(7): p. 922-930.
110. Achouri, A., et al., *The incremental contour method using asymmetric stiffness cuts*. Materials & Design, 2021. **197**: p. 109268.
111. Hosseinzadeh, F., et al., *Mitigating cutting-induced plasticity in the contour method, part 1: Experimental*. International Journal of Solids and Structures, 2016. **94-95**: p. 247-253.
112. Muránsky, O., et al., *Mitigating cutting-induced plasticity in the contour method. Part 2: Numerical analysis*. International Journal of Solids and Structures, 2016. **94-95**: p. 254-262.
113. Sun, Y.L., et al., *Evaluation of Errors Associated with Cutting-Induced Plasticity in Residual Stress Measurements Using the Contour Method*. Experimental Mechanics, 2017. **57**(5): p. 719-734.
114. Clausen, B., et al., *Complementary Measurements of Residual Stresses Before and After Base Plate Removal in an Intricate Additively-Manufactured Stainless-Steel Valve Housing*. Additive Manufacturing, 2020. **36**: p. 101555.
115. Buttle, D.J., et al., *Determination of residual stresses by magnetic methods*. 2006.
116. Hubert, A. and R. Schäfer, *Magnetic Domains, The Analysis of Magnetic Microstructures*. 1998: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
117. Takahashi, S. and H. Kikuchi, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (X) (Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics) (No. 10)*. 2007: IOS Press.
118. Hunt, D., *Measurement of stress*, , in *US Patent No.2370845*. 1945.
119. Jiles, D.C., *Review of magnetic methods for nondestructive evaluation*. NDT International, 1988. **21**(5): p. 311-319.
۱۲۰. م احمدی، م.ر. فراهانی ارزیابی تغییرات تنش پسماند طولی در راستای ضخامت در اتصال جوشی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه ها و شاره ها، ۱۳۹۶.
121. Javadi, Y., et al., *Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness*. Materials & Design, 2013. **49**: p. 591-601.
122. Javadi, Y., M. Akhlaghi, and M.A. Najafabadi, *Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates*. Materials & Design, 2013. **45**: p. 628-642.

123. Mahmoudi, A.H., M.R. Sheikhpour, and S. Heydarian, *A Novel Cutting Strategy for Measuring Two Components of Residual Stresses Using Slitting Method*. Experimental Mechanics, 2014. **54**(7): p. 1237-1246.
124. Moharrami, R. and H. Alizadeh, *Stress measurement on carbon steel specimen by consideration of Magnetic-Barkhausen-Noise*. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering 2017. **50** (5).
125. Ishigami, A., et al., *The effect of the weld fusion zone shape on residual stress in submerged arc welding*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **90**(9): p. 3451-3464.