



تنشگیری و بهبود خواص مکانیکی به وسیله ارتعاشات

در جوشکاری فولاد معمولی به فولاد زنگ نزن

محمد عزیزمرادی^{۱*}، سعید جعفری مهرآبادی^۲، علی نبی زاده^۳

^۱ شرکت ماشین سازی اراک، کیلومتر 4 جاده تهران، کد پستی 3819197888، اراک، ایران.

^۲ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، صندوق پستی 38135/567، اراک، ایران.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mazizmoradi@yahoo.com

چکیده

جوشکاری یکی از عملیات مهم در فرآیند ساخت تجهیزات در صنایع گوناگون است. این عملیات ممکن است در قطعات تنشهای پسماند ایجاد کند و در دراز مدت سبب آسیب به این قطعات گردد. روش متداول برای به حداقل رساندن تنشهای پسماند، روش تنش گیری حرارتی است. این روش در کنار مزایا و محاسن گوناگون، محدودیتهای و معایبی نیز دارد. یکی از محدودیت های تنش گیری حرارتی پیچیدگی یا عدم امکان عملیات حرارتی بر روی فولادهای زنگ نزن می باشد. چرا که در صورت عدم توجه به اثرات گرما بر ساختار این گونه فولادها نه تنها عملیات حرارتی موجب بهبود شرایط نخواهد شد بلکه ممکن است موجب ایجاد اشکالاتی در خواص و ویژگی های فولاد زنگ نزن گردد.

در این تحقیق کاهش تنش های پسماند ناشی از جوشکاری فولاد معمولی به فولاد زنگ نزن، همچنین بهبود خواص مکانیکی در روش فوق به وسیله ارتعاش مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با روش متداول تنشگیری حرارتی مقایسه گردیده است. برای انجام آزمایشات عملی، تعدادی نمونه و دستگاهی جهت ایجاد ارتعاش ساخته شدند. برای ساخت نمونه ها یک قطعه فولاد معمولی به قطعه دیگری از جنس فولاد زنگ نزن مونتاژ و طبق دستور العمل خاص برای این گونه اتصالات جوشکاری گردید. جهت ایجاد ارتعاش لازم برای انجام آزمایشات نیز دستگاهی ساخته شد که با دوران دیسک خارج از مرکز به وسیله الکتروموتور امکان ایجاد ارتعاشی در محدوده 20 هرتز را بوجود آورد. یکی از نمونه ها پس از جوشکاری، از یک طرف بوسیله پیچ و مهره به شاسی دستگاه ساخته شده و از طرف دیگر با جوش به تکیه گاه صلبی متصل گردید و در سه بازه زمانی به مدت پانزده دقیقه و جمعا به مدت چهل و پنج دقیقه تحت اثر ارتعاش دستگاه قرار گرفت. نمونه دوم در دوره عملیات حرارتی به روش مرسوم تنشگیری شد و بر روی نمونه آخر نیز هیچ گونه عملیات تنشگیری انجام نگرفت. جهت بررسی اثرات ارتعاش بر قطعات فولادی و جوش بین آنها و مقایسه با اثر تنشگیری حرارتی، آزمایشات مخرب و غیرمخرب گوناگونی بر روی هر سه نمونه انجام شد که نتایج قابل قبولی مبنی بر کاهش تنش پسماند همچنین بهبود خواص مکانیکی هر دو نوع فولاد در روش تنشگیری ارتعاشی به کمک تست های مکانیکی سختی سنجی، ضربه، کشش و خمش به دست آمد. در پایان نیز تغییرات و بهبود دانه بندی در نواحی مختلف نمونه ها خصوصا در ناحیه جوش به کمک متالوگرافی مورد بحث قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: تنش گیری ارتعاشی؛ بهبود خواص مکانیکی؛ فولاد معمولی و زنگ نزن.

1. مقدمه

عملیات جوشکاری یکی از ارکان فرآیند ساخت تجهیزات در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی است. این عملیات سبب ایجاد تنشهای پسماند در قطعات می گردد، که ممکن است منجر به تاب برداشتن، ترک خوردن و یا انهدام قطعات شود. به همین دلیل کاهش تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری یکی از مهمترین نگرانی ها در فرآیند ساخت در این صنایع می باشد. روش معمول و سنتی برای به حداقل رساندن تنشهای پسماند، روش تنش گیری حرارتی (Thermal Stress Relief) است که دارای محدودیتهای و معایبی می باشد.

تنش گیری به روش ارتعاشی یک روش جایگزین برای کاهش تنشهای پسماند بدون ایجاد آسیب در قطعه می باشد که در آن علاوه بر عدم ایجاد تغییر شکل و تابیدگی، کاهش چشمگیری در زمان تنش گیری، مصرف انرژی و ایجاد آلودگی محیط زیست نیز وجود دارد. جالب توجه است که مرتعش کردن قطعه برای کاهش تنش های پسماند در دو حالت مورد استفاده قرار می گیرد:

الف - ایجاد ارتعاش پس از اتمام جوشکاری جهت تنشگیری که می توان آن را با تنش گیری حرارتی مقایسه نمود

ب - ایجاد ارتعاش در حین انجام فرآیند جوشکاری جهت پیشگیری از ایجاد تنش پسماند که می توان آن را با پیش گرم کاری مقایسه نمود.

از سال 1943 برخی روشهای تجربی برای تسریع تنش گیری و تثبیت فولاد جوشکاری شده و سازه های چدنی از طریق ارتعاش و ترکیب ارتعاش و آویل کردن توسط گولدریچ و کاپتان ساندرز¹ پیشنهاد شد [1]. سالها بعد دانسون و موفات² تکنیک هایی برای بررسی توزیع تنش پسماند و اندازه گیری تغییرات تنش در تیرهای طره پیشنهاد کردند [2]. شانکار³ نیز در سال 1982 اثر ارتعاش در فرکانس رزونانسی و زیر رزونانسی روی تنش پسماند طولی مورد مطالعه قرار داد [3]. در بررسی های دیگری در سال 1982 نگرانی اثر ارتعاش بر کاهش عمر خستگی نیز توسط کلابا و آدامز⁴ بر طرف گردید [4]. در این رابطه محققین برای اندازه گیری میزان کاهش تنش پسماند با تنشگیری ارتعاشی از روش های مختلفی از جمله تکنیک تفرق نوترونی [5]، ایجاد سوراخ در قطعات و اندازه گیری تغییرات ابعاد سوراخ [6] و روش تفرق اشعه ایکس [7] استفاده نمودند. تحقیقات به عمل آمده توسط هیرایی و آوکی⁵ در سال 1995 نشان داد که علاوه بر اینکه ایجاد ارتعاش قطعه در کاهش تنشهای پسماند پس از جوشکاری موثر است ایجاد ارتعاش در حین فرآیند جوشکاری نیز مانع بوجود آمدن تنش های پسماند می گردد به طوری که بر روی ورقهایی که همزمان با جوشکاری با امواج مافوق صوت مرتعش شده اند تنش پسماند کمتری نسبت به حالت معمولی ایجاد می گردد [8]. مدل سازی راه حل مناسبی برای بررسی تحلیلی تحقیقات عملی می باشد که این کار با استفاده از تکنیک المانهای محدود و نرم افزار ANSYS در مورد تنشگیری با ارتعاش توسط ویلیام اف هان⁶ [9] و مایکل ای رابینز⁷ [10] صورت گرفت. یانگ⁸ در سال 2005 مقاله ای منتشر کرد و در آن تنشگیری ارتعاشی را از نظر محدوده فرکانس تنش گیری به دو نوع رزونانسی و غیر رزونانسی مورد بحث قرار داد در این تحقیق نشان داده شد که در روش تنش گیری ارتعاشی غیر رزونانسی کاهش تنش به شدت وابسته به دامنه ارتعاش بوده و در روش تنشگیری رزونانسی فرکانس ارتعاش برای تنشگیری امری حیاتی است [11].

در این تحقیق به بررسی کاهش تنشهای پسماند و بهبود خواص مکانیکی در جوشکاری بین فولادهای معمولی و فولادهای زنگ نزن پرداخته خواهد شد.

1 R. T. McGoldrick & Captain Harold E
2 R Dawson & D. G. Moffat
3 S. Shankar
4 B. B. Klauba, C. Mel Adams
5 Seiji Hirai, Shigeru Aoki
6 William F. Hahn
7 Michael E. Robbins
8 Y. P. Yang

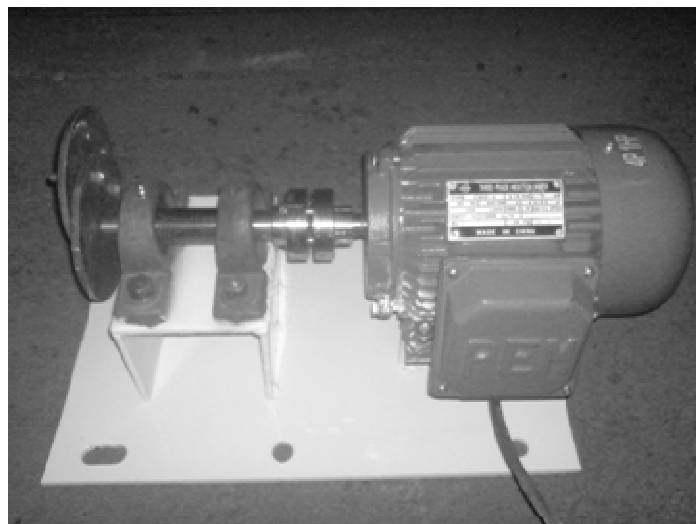
2. عملیات اجرایی

دقت همانگونه که در مقدمه بیان شد هدف از این تحقیق بررسی اثرات ارتعاش بر اتصال و جوشکاری فولادهای معمولی به فولادهای زنگ نزن است. برای انجام این کار نیاز به ساخت تجهیزاتی جهت ایجاد ارتعاش و همچنین ساخت تعدادی نمونه بود که پس از انجام تنش گیری به روشهای ارتعاشی و حرارتی مورد آزمایشات مختلف قرار گرفته و نتایج مقایسه شدند.

2.1 ساخت تجهیزات جهت تولید ارتعاش

برای تولید ارتعاش و انجام تنشگیری ارتعاشی تجهیزاتی مطابق شکل شماره (1) از بخشهای زیر ساخته شد:

- موتور الکتریکی تک فاز با توان 0/75 کیلووات و دور 1250 دور در دقیقه.
- دیسک فولادی به ضخامت 8 و قطر 100 میلی متر که به صورت خارج از مرکز دوران میکند.
- دو عدد یاتاقان با تحمل نیروی بالا جهت جلوگیری از انتقال ارتعاش به محور موتور الکتریکی.



شکل 1 - تجهیزات ایجاد ارتعاش

2.2 ساخت نمونه ها

برای انجام و بررسی، تعدادی نمونه مورد نیاز بوده که هر یک از این نمونه ها با مونتاژ و جوش یک قطعه فولاد معمولی (A516-70) به فولاد زنگ نزن (A240-304L) با ضخامت 12 میلی متر ساخته شدند. نمونه ها پس از مونتاژ با توجه به دستور العمل جوشکاری مربوطه به یکدیگر جوش داده شدند. بر روی نمونه شماره 1 هیچگونه تنش گیری صورت نگرفته و نمونه های شماره 2 و 3 به ترتیب به روشهای حرارتی و ارتعاشی تنش گیری شدند.

2.3 تنش گیری ارتعاشی

برای انجام تنش گیری ارتعاشی، نمونه مربوطه از یک طرف مطابق با سوراخهای روی شاسی سوراخکاری و بوسیله چهار عدد پیچ و مهره به شاسی محکم بسته شد و از طرف دیگر با جوش به تیکه گاه ثابتی متصل گردید. قطعه برای سه بار به مدت پانزده دقیقه و با فواصل زمانی ده دقیقه ای با فرکانس 20 هرتز مرتعش گردید.

2.4 تنش گیری حرارتی

تنش گیری حرارتی طبق دستورالعملی که مطابق با استاندارد ASME تدوین گردیده ، صورت گرفت. مطابق با این دستور العمل دمای نمونه تا 425 درجه سانتیگراد با شیب ملایم دلخواه بالا برده شده و سپس دما با شیب 220 درجه سانتیگراد در ساعت تا 610 درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمونه به مدت 60 دقیقه در دمای 610 ± 10 نگهداشته شده و سپس با شیب 260 درجه سانتیگراد در ساعت دما تا 425 درجه سانتیگراد پایین آورده شد از 425 درجه به پایین نیز با شیب ملایم دلخواه تا دمای محیط سرد شد. کل زمان تنشگیری 154 دقیقه به طول انجامید.

3. انجام آزمایشات

3.1 تست سختی سنجی

برای بررسی سختی در نواحی مختلف فلز پایه و جوش قبل از هر گونه عملیات تنش گیری از هر یک از نمونه ها قطعه ای بریده و آماده سازی شد. تست سختی سنجی با معیار سختی برینل به ترتیب در پنج ناحیه فلز اصلی بخش کربن استیل (*Carbon Steel Base Metal*)، ناحیه متأثر از حرارت در بخش کربن استیل (*Carbon Steel Heat Affected Zone*)، فلز جوش (*Weld Metal*)، ناحیه متأثر از حرارت در بخش استنلس استیل (*Stainless Steel Heat Affected Zone*) و ناحیه فلز اصلی بخش استنلس استیل (*Stainless Steel Base Metal*) انجام گرفت. نتایج این آزمایشات در جدول شماره (1) وجود دارد. این مقادیر میانگین سه بار تست در هر ناحیه می باشد

جدول شماره 1: میانگین مقادیر سختی بر حسب برینل قبل از تنش گیری

شماره نمونه	<i>S.S.B.M</i>	<i>S.S.H.A.Z.</i>	<i>W.M.</i>	<i>C.S.H.A.Z.</i>	<i>B.S.B.M</i>
01	180	210	185	200	160
02	180	210	190	205	162
03	176	205	180	200	159

پس از انجام تنشگیری حرارتی و ارتعاشی دوباره از هر تست پلیت نمونه جدیدی تهیه و سختی سنجی از پنج ناحیه در نمونه ها انجام شد که میانگین مقادیر اندازه گیری شده در سه بار تست سختی سنجی در جدول شماره (2) آورده شده است.

جدول شماره 2: میانگین مقادیر سختی بر حسب برینل بعد از تنش گیری

شماره نمونه	<i>S.S.B.M</i>	<i>S.S.H.A.Z.</i>	<i>W.M.</i>	<i>C.S.H.A.Z.</i>	<i>B.S.B.M</i>
02	172	195	180	180	146
03	165	185	176	190	150

این کاهش سختی یکی از علائم کاهش تنش پسماند و صحت انجام تنشگیری ارتعاشی می باشد

3.2 تست ضربه

هر چه مقادیر استحکام و انعطاف پذیری فولاد بالاتر باشد مقاومت به ضربه در فولاد افزایش می یابد که این خصوصیت مکانیکی در دماهای بسیار پایین قابل ملاحظه و مورد اهمیت است. در این تحقیق نشان داده می شود که یکی از اثرات مهم ارتعاش بر فولاد افزایش مقاومت فولاد به ضربه در دمای پایین می باشد. برای بررسی این موضوع تست ضربه نیز بر روی نمونه هایی که از نواحی مختلف فلز اصلی، فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت تهیه شدند، انجام گرفت. در این آزمایش دمای نمونه ها به وسیله الکل و دی اکسید کربن جامد (یخ خشک) تا 46 درجه سانتیگراد زیر صفر کاهش یافت. مقادیر بدست آمده از آزمایشات ضربه برای نمونه ها به شرح ذیل در جدول شماره (3) ذکر گردیده است. مقادیر جئول میانگین بدست آمده از سه تست ضربه در هر ناحیه می باشد.

جدول شماره 3: نتایج آزمایشات ضربه بر حسب ژول

شماره نمونه	HAZ	Weld	Base metal
01	58	76	30
02	60	86	34
03	62	88	48

از نتایج این آزمایشات در نواحی مختلف می توان نتیجه گیری کرد که تنش گیری با هر دو روش حرارتی و ارتعاشی باعث افزایش مقاومت نمونه ها در برابر ضربه در دمای پایین، در تمام نواحی جوش شده است.

3.3 تست کشش

از هر یک از تست پلیتهای دو نمونه جهت تست کشش نیز ساخته شد و تست استحکام کششی بر روی آنها انجام گرفت. نتایج به شرح جدول شماره (4) بدست آمد:

جدول شماره 4: نتایج آزمایشات کشش بر حسب مگاپاسکال

شماره نمونه	میانگین مقادیر تست کشش
01	623
02	617
03	627

از نتایج آزمایشات کشش نمونه ها می توان نتیجه گیری کرد تنش گیری با روش حرارتی باعث کاهش تنش تسلیم در نمونه می شود و این در حالیست که با تنش گیری به شیوه ارتعاشی تنش تسلیم افزایش نیز خواهد داشت.

3.4 تست خمش

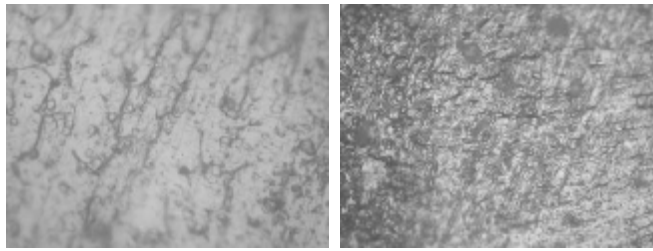
یکی از نگرانی هایی که در تنش گیری به روش ارتعاشی وجود دارد نگرانی از ایجاد خستگی در قطعه کار است برای اطمینان از این موضوع علاوه بر اینکه نتایج کلیه آزمایشات مکانیکی انجام داده شده در محدوده قابل قبول بوده اند، تست خمش نیز انجام گرفته است برای اینکار چهار نمونه بریده شده از تست پلیتهای که کل مقطع جوش و فلز پایه و ناحیه متاثر از حرارت را در بر می گیرند تهیه شد.

نمونه ها همزمان و در کنار یکدیگر تحت خمش قرار گرفتند که این تست برای هر سه تست پلیت انجام گرفته که هیچ یک از نمونه ها در برابر خمش دچار شکست و ترک بیشتر از حد استاندارد نگردیدند.

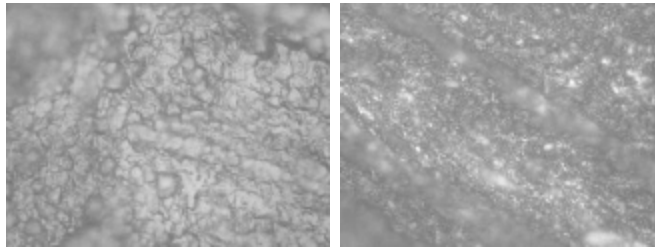
3.5 متالوگرافی

همانگونه که ذکر شد دما برای انجام تنش گیری حرارتی حدود 600 درجه سانتیگراد می باشد که در این دما هیچگونه تغییری در ساختار کریستالی فولاد بوجود نمی آید. بنابراین انتظار می رود که مرز بین فازها از حالت تیزی به شکل منحنی با شیب ملایم تغییر کند همچنین دانه بندی فازها از حالت یکپارچه به تکه های کوچکتر تقسیم می شوند.

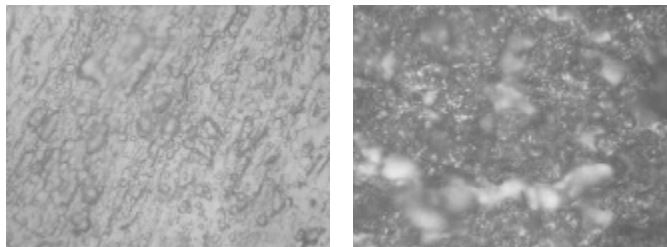
جهت بررسی دانه بندی نمونه ها از هر یک از تست پلیتهای نمونه ای ساخته و تصاویری با مقیاس 500 برابر از نواحی فولاد معمولی و زنگ نزن تهیه شده است. تصاویر موجود در شکل شماره (2) مربوط به ناحیه کربن استیل (سمت راست) و استنلس استیل (سمت چپ) در نمونه تنش گیری نشده، شکل شماره (3) مربوط به نمونه تنش گیری حرارتی شده و شکل شماره (4) نیز مربوط به نمونه تنش گیری ارتعاشی شده می باشند.



شکل 2- ناحیه کربن استیل و استنلس استیل نمونه تنش گیری نشده



شکل 3- ناحیه کربن استیل و استنلس استیل نمونه تنش گیری حرارتی شده



شکل 4- ناحیه کربن استیل و استنلس استیل نمونه تنش گیری ارتعاشی شده

در توضیح تصاویر بدست آمده از متالوگرافی نکات ذیل قابل ذکرند:

- در تصاویر تهیه شده از نمونه تنش گیری نشده عموماً دانه بندی ها به شکل زاویه دار و نوک تیز می باشند که بیانگر تشکیل فازهای نزدیک به مارتنزیت و سخت می باشند.
 - در تصاویر مربوط به نمونه های تنش گیری شده با حرارت دیده می شود که فازبندی ها تا حدی منظم تر و گوشه های فازهای تشکیل شده تیزی کمتری دارند.
 - در تصویر مربوط به نمونه تنش گیری شده با روش ارتعاشی نیز دیده می شود که مرز فازها به شکل منظم و اندازه های کوچکتر در آمده و گوشه های تیز کمتر به چشم می خورند.
- از آنجا که تنشهای باقیمانده در نواحی جوشکاری شده، ناشی از وجود تنشهای کششی و فشاری میان بخشهای داخلی فولاد می باشد، تغییر شکل‌های پلاستیک میکروسکوپی ناشی از حرکت‌های نوسانی باعث کاهش گوشه های تیز و نقاط تمرکز تنش و همچنین ایجاد آرایش مناسبتری در مرزدانه های فولاد می گردد. این تغییرات در مرزدانه ها که در تصاویر به دست آمده از متالوگرافی قابل مشاهده است، نهایتاً منجر به کاهش تنشهای پسماند و بهبود در خواص مکانیکی می شوند.

4. نتیجه گیری :

خلاصه ای از نتایج حاصل از آزمایشات عبارتند از:

- نتایج تست سختی و مقایسه مقادیر بدست آمده از نمونه های حرارتی و ارتعاشی صحت انجام تنش گیری به روش ارتعاشی را تأیید می نماید.

- نتایج تست ضربه افزایش مقاومت به ضربه در دمای پایین را برای نمونه های تنش گیری شده نشان می دهد.
- نتایج تست کشش نشان می دهد که تنش گیری حرارتی موجب کاهش استحکام تسلیم شده در حالی که در روش ارتعاشی نه تنها این مشکل وجود ندارد بلکه بهبود در استحکام کششی نیز مشاهده می شود.
- نتایج تست خمش بیانگر این موضوع است که در تنش گیری به روش ارتعاشی نگرانی جهت خسته شدن قطعات وجود ندارد.
- تصاویر بدست آمده از متالوگرافی شباهت دانه بندی در نواحی مختلف نمونه ها را در حالت های تنش گیری ارتعاشی و حرارتی شده بیان و صحت انجام تنش گیری را تأیید می نماید.

تشکر و قدردانی

با تشکر فراوان از جناب آقای مهندس بیرامی مدیر عامل محترم گروه ساخت تجهیزات که در انجام این تحقیق دلسوزانه حمایتان کردند و همچنین کلیه همکاران محترمی که ما را در این راه صمیمانه یاری نمودند.

مراجع

1. R. T. McGoldrick, Captain Harold E. Saunders, "Some Experiments in Stress relieving Casting and Welded Structures by Vibration", *Journal of the American Society of Naval Engineers* (1943).
2. R. Dawson, D. G. Moffat, "Vibratory Stress Relief: A Fundamental Study of Its Effectiveness", *Journal of Engineering Materials and Technology* (1980).
3. S. Shankar, "Vibratory Stress Relief in Mild Steel Weldments", *A dissertation submitted to the faculty of Oregon Graduate center in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy* (1982).
4. B.B. Klauba, C. Mel Adams, "A Progress Report on the use and Understanding of Vibratory Stress Relief", *Productive applications of Mechanical Vibrations* (1982).
5. S. Spooner, S. A. David, J. H. Root, "Effect of Vibratory Stress Relief During Welding of Thick Stainless Steel Plate", *The American welding Society* (1993).
6. G. C. Luh, R.M. Hwang, "Evaluating the effectiveness of vibratory stress relief by a modified hole – drilling method", *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology* (1998).
7. Sh. Aoki, T. Nishimura, T. Hiroi, "Reduction method for Residual Stress of Welded joint using Random Vibration", *Journal of Nuclear engineering and design* (2005).
8. S. Hirai, Sh. Aoki, "Reduction of Residual Stress by Ultrasonic Surface Vibration", *Journal of Japanese Society of Mechanical Engineers* (1995).
9. W. F. Hahn, "Vibratory Residual Stress Relief And Modifications in Metals to Conserve Resources and Prevent Pollution", *Submitted to Alfred University Center of Environmental and Energy Research* (2002).
10. M. E. Robbins, "Topics in Vibratory Stress Relief of Weldments", *A Seminar submitted to the faculty of Rensselaer at Hartford in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science* (2004).
11. Y. P. Yang, "Finite Element Modeling of Vibration Stress Relief after Welding", *Presented at the American society of Materials* (2005).