http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

دوره ۱۲ شماره ۴ آبان ۱۳۹۱ ص ۲۱-۳۳

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۱/۲/۱۳
پذیرش ۹۱/۴/۵
ارائه در سایت ۹۱/۶/۳۰

بررسی تجربی فرایند تنش‌گیری اولتراسونیک بر روی قطعات فولادی با درنظر گرفتن اثر اندازه دانه‌ها

مقصود شلوندی[۱]، یوسف حجت[۲*]، امیر عبدالله[۳]، حمید اسدی[۴]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۴- استاد مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، y_hojjat@modares.ac.ir

چکیده- تنش‌گیری فلزات با استفاده از ارتعاشات تا کنون فقط در فرکانس‌های پایین انجام شده است. در این پژوهش، نشان داده شده است که تنش‌گیری با ارتعاشات فرکانس بالا (اولتراسونیک) نیز امکان‌پذیر است. همچنین، پارامترهای موثر در فرایند تنش‌گیری شامل زمان تنش‌گیری، دامنه ارتعاشات، اندازه دانه‌های کریستالی مواد و نیروی پیش‌بار برای اعمال ارتعاشات به نمونه‌ها بررسی شده است. برای بررسی مقدار تنش پسماند، در حالت قبل و بعد از تنش‌گیری اولتراسونیک، از تست المن استفاده شد. برای بررسی پارامترهای مورد نظر، با استفاده از عملیات حرارتی ویژه‌ای، نمونه‌های المن با اندازه دانه متفاوت تولید و برای ایجاد تنش، عملیات شات پینینگ بر روی آن‌ها انجام شد. سپس با اعمال ارتعاشات در شرایط متفاوت تنش‌گیری انجام شد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند پس از تنش‌گیری نشان داد که در نمونه‌های درشت‌دانه در حدود ۴۶ درصد و در تسمه‌های ریزدانه در حدود ۲۷ درصد از مقدار تنش‌های پسماند کاسته می‌شود. همچنین، از بین پارامترهای بررسی‌شده، اندازه دانه بیشترین تاثیر و نیروی پیش‌بار کمترین تاثیر را در نرخ تنش‌گیری داشته‌اند.

کلیدواژگان: تنش‌گیری، اولتراسونیک، اندازه دانه‌ها، دامنه ارتعاشات

Experimental evaluation of ultrasonic stress relieving on steel specimens considering grain size effect

M. Shalvandi [1], Y. Hojjat[2*], A. Abdullah[3], H. Asadi[4]

1- PhD Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
3- Assoc. Prof., Mechanical Eng., Amir Kabir Univ., Tehran, Iran
4- Prof., Material Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
* P. O. B. 14115-143 Tehran, y_hojjat@modares.ac.ir

Abstract- Low frequencies vibration is known as a method for stress relieving of metals. This paper shows that the high frequency vibration (ultrasonic) is also a promising method for stress relieving. In this paper the effect of parameters including stress relieving time, vibration amplitude, grain size and pre-load on samples are investigated. In order to evaluate the residual stress before and after ultrasonic relieving process Almen test was used. The samples were made according to Almen standard and after heat treatment, were shot peened so that, the compressive and tensional residual stress induced into the samples, then the stress relieved by means of ultrasonic vibration. Results show that the residual stress has decreased about 46 percent for coarse grain samples and 27 percent for fine grain samples. Also it was found that the most effective factor on the stress relieving rate is the grain size and the pre-load has the least effect.

Keywords: Stress Relieving, Ultrasonic, Grain Size, Ultrasonic Amplitude

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]

۱- مقدمه

تنش‌های پسماند در قطعات، حین عملیات تولیدی خاصی از قبیل جوشکاری، ساچمه‌زنی، ریخته‌گری و یا نورد، پدید می‌آیند. این تنش‌ها در حالت خودتعادلی قرار داشته و در حالتی که قطعات تحت اثر هیچ نیروی خارجی قرار ندارند، سبب ایجاد میدان‌های تنش تک‌محوری و یا چندمحوری در جهت‌های طولی، عرضی و ضخامتی می‌شوند.

از معایب وجود تنش‌های پسماند (به‌ویژه تنش‌های پسماند کششی)، می‌توان به ایجاد ناپایداری ابعادی، اعوجاج و ترک در قطعات اشاره کرد که کارکرد بهینه قطعات را تحت تاثیر قرار داده و طول عمر آن‌ها را برای کاربرد مورد نظر کاهش می‌دهند. تنش‌های پسماند اثر مخرب خود را هنگام بارگذاری نیز نشان می‌دهند و هنگامی که یک قطعه دارای تنش پسماند تحت بارگذاری خارجی قرار می‌گیرد، تنش‌های ناشی از بارگذاری خارجی به تنش‌های پسماند موجود افزوده شده و پدیده‌هایی از قبیل تسلیم، خستگی و شکست را در قطعات سرعت می‌بخشند.

یکی از روش‌های کاهش تنش‌های پسماند روش حرارتی است که در این روش قطعات را داخل کوره عملیات حرارتی قرار داده و با نرخ معینی دمای کوره افزایش می‌یابد. سپس به مدت زمان مشخصی که در استانداردها بیان شده است، در دمای تنش‌گیری نگهداری شده و با نرخ سردکردن ایدئال تا رسیدن به دمای محیط سرد می‌شوند.

روش عملیات حرارتی برای بسیاری از قطعات مقدور بوده و مقرون به صرفه است، اما در بسیاری از موارد، محدودیت‌هایی از قبیل اندازه قطعات، مقدار انرژی لازم برای عملیات حرارتی و قابل حمل نبودن قطعات سبب می‌شود از روش‌های مکانیکی از قبیل اولتراسونیک پینینگ[1]، ضربه‌زنی[2]، تنش‌گیری ارتعاشی[3] و غیره استفاده شود.

تحقیقات زیادی بر روی کارایی و راندمان تنش‌گیری ارتعاشی در فرکانس‌های پایین انجام شده است. مک گلودریک برای اولین‌بار در سال ۱۹۴۳[۱]، با هدف کاهش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، ارتعاشاتی با فرکانس پایین‌تر از فرکانس رزونانس را به قطعات اعمال کرد. در این تحقیق، از فرکانس‌های ۱۰ تا ۳۰ هرتز و دامنه ۲/۵ تا ۹/۵ میلی‌متر استفاده شد و مشخص شد که مقدار تغییر شکل پلاستیک و اعوجاج سازه‌ها در نتیجه اعمال ارتعاشات قابل صرف‌نظر بوده و ترک یا شکستی در نتیجه اعمال ارتعاشات به‌وجود نیامده است. در این تحقیق، مقایسه بین حالت قبل و بعد از اعمال ارتعاشات صورت نگرفت.

تحقیقات وزنی و کراومر در سال ۱۹۶۸[۲] بیشترین تاثیر را درشناخت مکانیسم و راندمان فرایند تنش‌گیری ارتعاشی داشته است. در این تحقیق، فرایند تنش‌گیری ارتعاشی با فرکانس رزونانس، بر روی تسمه‌های المن انجام گرفت و به مقدار ۳۳ درصد تنش‌های پسماند موجود کاهش یافت.

لوکشین در سال ۱۹۶۵[۳] از ارتعاشات با فرکانس رزونانسی برای تنش‌گیری حلقه‌های آلومینیومی ریخته‌گری‌شده استفاده کرد و در این تحقیق حداکثر به مقدار ۷۰ درصد از مقدار تنش‌های پسماند قطعات کم شد.

داوسن و مفات در سال ۱۹۸۰[۴]، برای بررسی بیشتر اثر ارتعاشات با فرکانس پایین بر روی مواد مختلف، از فرکانس‌های رزونانس ۳۳ و ۶۶ و ۹۲ هرتز استفاده کرده و مشاهده کردند که با تغییر فرکانس، تفاوت معنی‌داری در کاهش تنش‌های پسماند دیده نمی‌شود. در این تحقیق، با افزایش دامنه کرنش تناوبی، مقدار تنش‌های پسماند نیز به‌صورت خطی کاهش یافت.

والکر و همکاران در سال ۱۹۹۴[۵] توانستند تنش‌های پسماند کششی را با روش نورد در فولاد کم آلیاژی ایجاد کرده و با اعمال ارتعاشات با فرکانس ۱۰۰ هرتز به مقدار ۴۰ درصد از تنش‌های پسماند اولیه را کاهش دهند. همچنین، والکر مدلی را ارائه کرد که در آن، با استناد به اثر ترکیبی تنش‌های پسماند اولیه و تنش‌های ناشی از بارگذاری ارتعاشی خارجی، حرکت نابجایی‌ها را تشریح کرد و از XRD برای سنجش مدل خود بهره جست.

در سال ۲۰۰۱[۷] والکر و همکاران تنش‌های پسماند جوشی را با تنش‌گیری ارتعاشی کاهش داده و نتایج آن را با عملیات حرارتی مقایسه کردند. در این تحقیق، از فرکانس رزونانس ۲۵ هرتز استفاده گردید و نتایج حاصله نشان داد که در اثر تنش‌گیری حرارتی، تنش‌ها به مقدار ۴۳ درصد کاهش یافته و با روش تنش‌گیری ارتعاشی حداکثر به مقدار ۳۰ درصد کاهش داشته است.

1. Ultrasonic Peening
2. Hammer Peening
3. Vibratory stress relief

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]

وانگ در سال ۲۰۰۴[۸] تحقیق مشابهی را بر روی تنش‌گیری ارتعاشی فولادهای HSLA[1] انجام داد و به کاهش ۲۵ مگاپاسکال از تنش‌های پسماند سازه‌های جوشی ساخته شده از این فولاد رسید. این مقدار با کاهش دیده شده در تنش‌گیری حرارتی یکسان است.

استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک برای تنش‌گیری توسط آوکی در سال ۲۰۰۵[۹] ارائه شد. این تحقیق، با هدف اثبات کارایی ارتعاشات با فرکانس بالا، برای کاهش تنش‌های پسماند، در مرحله شکل‌گیری (در حین فرایند جوشکاری) انجام شد و از فرکانس رزونانس ۱۷/۸ هرتز استفاده شد.

لیگون در سال ۲۰۱۰[۱۰] از ارتعاشات اولتراسونیک با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۱۵ تا ۱۹ میکرون برای تنش‌گیری نمونه‌های دولایه از جنس فتورزیست استفاده کرد. تنش‌های پسماند اولیه در این نمونه‌ها، پس از لایه نشانی دو ماده بر روی یکدیگر و تفاوت ضریب انبساط طولی آن‌ها، به صورت خمش ظاهر گردید و پس از تنش‌گیری مقدار خمش کاهش یافت. تحقیقات لیگون نشان داد که با افزایش دامنه ارتعاشات، راندمان تنش‌گیری افزایش می‌یابد و با افزایش زمان تنش‌گیری تا زمان ۱۰ دقیقه، راندمان تنش‌گیری افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.

در تحقیقات انجام‌شده، آوکی و لیگون از ارتعاشات اولتراسونیک برای تنش‌گیری استفاده کرده‌اند، اما در تحقیقات آوکی تنش‌های پسماند مرحله شکل‌گیری کاهش یافته و توزیع تنش‌های پسماند تغییر می‌کند. لذا، با وجود تلاش‌های فراوان و ارزشمند در زمینه تنش‌گیری مکانیکی، به‌نظر می‌رسد که تنش‌گیری با اعمال ارتعاشات کاملاً بررسی نشده است و به تنش‌گیری قطعات فلزی دارای تنش پسماند پرداخته نشده است. لذا در مقاله حاضر، تنش‌گیری قطعات فلزی با روش اولتراسونیک بررسی شده است. برای ایجاد تنش‌های پسماند اولیه، عملیات شات‌پینینگ بر روی تسمه‌های المن انجام شده سپس تنش‌گیری صورت می‌گیرد و مقادیر تنش پسماند در دو حالت قبل و بعد از تنش‌گیری مقایسه می‌شوند.

۲- محاسبه تنش پسماند در تسمه‌های المن

برای محاسبه مقدار تنش پسماند در تسمه المن، سه روش وجود دارد: روش اندازه‌گیری انحناء تسمه المن، روش سوراخکاری[2] و روش XRD. با توجه به این که روش سوراخکاری روشی مخرب بوده و دقت زیادی در اندازه‌گیری تنش پسماند ورق‌های نازک ندارد و همچنین روش XRD زمان‌بر و پرهزینه است، لذا از اندازه‌گیری انحناء المن برای تخمین مقدار تنش پسماند موجود در نمونه‌های المن استفاده شده است.

در عملیات شات پینینگ، تسمه المن بصورت همگن تحت عمل ساچمه‌زنی قرار می‌گیرد لذا توزیع تنش‌های پسماند در سطح تسمه المن یکسان بوده و با استفاده از اندازه‌گیری انحناء تسمه المن تقریب بسیار خوبی از تنش‌های پسماند بدست می‌آید. در شکل ۱، شماتیکی از عملیات شات‌پینینگ و اندازه‌گیری انحناء المن نشان داده شده است.

پس از عملیات شات پینینگ، تنش‌های پسماند ایجادشده بر روی تسمه المن تمایل به تغییرشکل تسمه داشته اما به‌دلیل محدودبودن تسمه در نگهدارنده و نیروی اعمالی از طرف پیچ‌های نگهدارنده، تسمه به حالت مستقیم می‌ماند، اما پس از بازکردن تسمه از روی نگهدارنده، ممان خمشی ناشی از تنش‌های پسماند، تسمه را تغییر شکل داده و انحناء المن ایجاد می‌شود.

طبق رابطه والتون[۱۱] رابطه بین انحناء المن و تنش‌های پسماند به صورت رابطه (۱) است.

$$\sigma_{res} = \frac{Etd}{2L^2} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، d ارتفاع المن، E مدول الاستیک فلز المن، t ضخامت تسمه المن استفاده‌شده، L فاصله تکیه‌گاه‌های گیج اندازه‌گیری ارتفاع المن و σ_{res} تنش‌های پسماند حاصل از شات‌پینینگ است.

با توجه به اینکه در رابطه والتون d ارتفاع تسمه المن در انتهای تسمه بوده و در حالتی که انتهای تسمه المن ثابت شده است محاسبه می‌شود، لذا در اندازه‌گیری ارتفاع المن با ساعت اندازه‌گیر مقدار ارتفاع اندازه‌گیری شده برابر با $h = d/4$ است. با جاگذاری مقدار h در رابطه (۱)، رابطه بین تنش پسماند و انحناء اندازه‌گیری شده در وسط تسمه به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{res} = \frac{2Eth}{L^2} \qquad (۲)$$

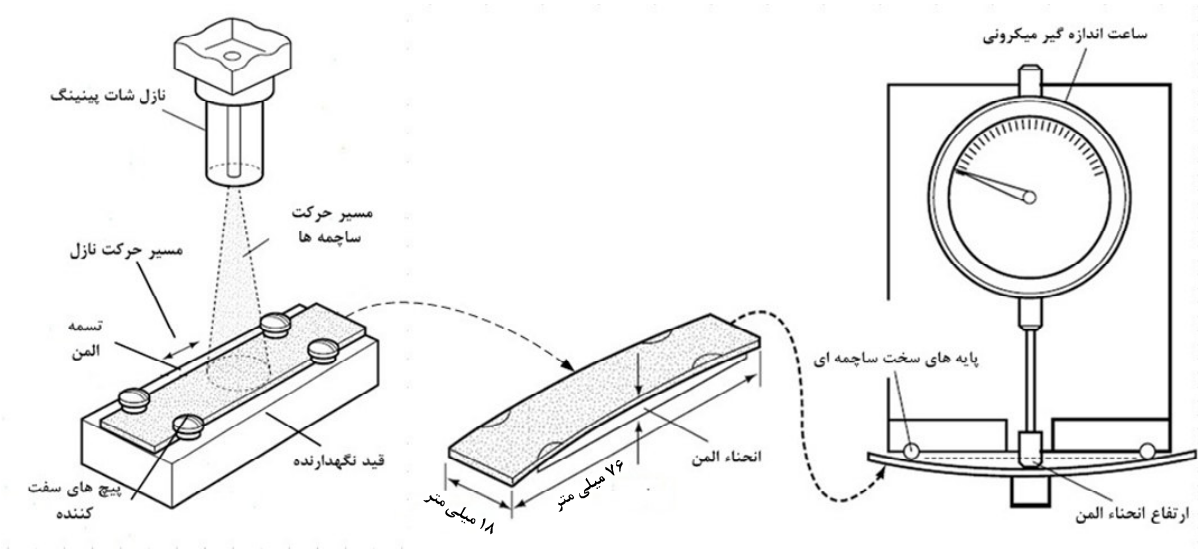
در رابطه (۲)، مقدار L، h و t بر حسب میلی‌متر بیان شده و تنش پسماند حاصل بر حسب MPa به‌دست می‌آید.

1. High Strength Low Alloy steel

2. Hole drilling

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]



شکل ۱ اندازه‌گیری انحناء تسمه المن پس از شات پینینگ

۳- مواد و تهیه نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌های تجربی فولاد ۱/۰۰۶۵ نورد گرم‌شده انتخاب گردید. این فولاد یکی از فولادهای پرکاربرد در صنایع است و در هنگام جوشکاری و نورد، تنش‌های پسماند ناخواسته در آن ایجاد می‌شود. آنالیز شیمیایی فولاد انتخاب‌شده بر اساس تست کوانتومتری ARL 3460 در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد استفاده‌شده در آزمایش‌ها

عنصر	C	Si	S	P	MN	Mo
درصد	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۲۳	۰/۰۰۹۹
عنصر	V	Cu	Cr	W	PB	Fe
درصد	۰/۰۳۳	۰/۰۲۷	۰/۰۳۹	۰/۰۳۵۷	۰/۰۰۶۳	۹۹/۴۰

خواص مکانیکی فولاد بر اساس استاندارد ASM[۱۲] در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ خواص مکانیکی فولاد ۱/۰۰۶۵ در استاندارد ASM

خواص	فولاد نورد گرم‌شده	فولاد نورد سردشده
تنش تسلیم (MPa)	۱۷۰	۳۰۰
استحکام کششی (MPa)	۲۸۰	۳۳۰
کاهش سطح مقطع (٪)	۵۵	۴۵
سختی HB	۸۶	۹۵
تغییرطول در 50mm (٪)	۳۰	۲۰
مدول الاستیک (GPa)	۲۰۰	۲۰۰

برای تهیه تسمه‌های المن از روش واترجت برای برش و از فرزکاری برای به‌اندازه رساندن تسمه‌ها استفاده شد. ابعاد نهایی تسمه المن برای انجام تست‌های شات‌پینینگ در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ ابعاد تسمه المن [۱۵،۱۴]

بعد	اندازه (میلی‌متر)	تلرانس(میلی‌متر)
طول	۷۶/۱۱۱	± ۰/۲۹۲
عرض	۱۸/۹۹	± ۰/۰۶۴
ضخامت	۲	± ۰/۰۲۵

۴- آزمایش‌های تجربی

۴-۱- عملیات حرارتی

در این تحقیق، عملیات حرارتی تسمه‌های المن به دو منظور انجام شده است:

- تنش‌گیری ماده خام اولیه
- رسیدن به دانه‌بندی و اندازه دانه متفاوت در تسمه‌ها

بر اساس استاندارد ASM[۱۳]، دمای تنش‌گیری فولاد استفاده‌شده ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد و دمای لازم برای عملیات آنیلینگ ۸۴۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به اینکه با انجام عملیات آنیلینگ تنش‌گیری اولیه نیز انجام می‌شود، لذا دمای تنش‌گیری و آنیلینگ ۸۴۰ تا ۱۰۵۰ درجه و زمان نگهداری در کوره ۴۵ دقیقه انتخاب شد تا ضمن تنش‌گیری اولیه بتوان به دانه‌بندی متفاوت در تسمه‌ها دست یافت.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]

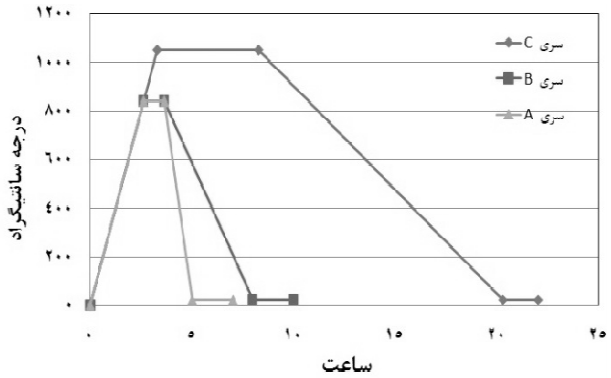
برای به‌دست آوردن دانه‌هایی با اندازه متفاوت در تسمه‌ها، سه نوع عملیات حرارتی آنیلینگ با نرخ سردشدن متفاوت انجام شد. در ابتدا تسمه‌های المن به سه دسته تقسیم شد. دسته اول در داخل کوره عملیات حرارتی با نرخ ۵ درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه تا دمای ۸۴۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد و پس از ۴۵ دقیقه نگهداری در این دما از کوره بیرون آورده شد و تا رسیدن به دمای محیط در اتمسفر هوا خنک شد.

در عملیات حرارتی دسته دوم، پس از گرم‌شدن نمونه‌ها در کوره با نرخ ۵ درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه و نگهداری به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۸۴۰ درجه، کوره خاموش گردید و تسمه‌ها تا رسیدن به دمای محیط به‌آرامی در کوره خنک شدند. دسته سوم از تسمه‌های المن با نرخ یکسان تا دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و پس از نگهداری به مدت یک ساعت در این دما، با نرخ ۱ درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه و در داخل کوره تا رسیدن به دمای محیط سرد شدند.

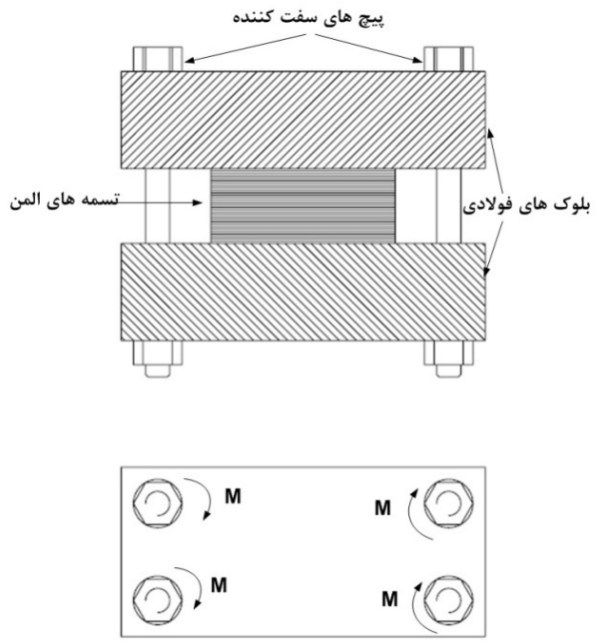
ملاک انتخاب دما و زمان‌های عملیات حرارتی نمونه‌ها عوامل موثر در اندازه دانه‌هاست و عوامل موثر در ریزدانه و یا درشت‌دانه شدن ساختار فولاد عبارت‌اند از دمای آستنیته، زمان نگهداری در دمای آستنیته و نرخ سردشدن. با توجه به این موضوع، می‌توان گفت در دسته اول تسمه‌های المن (سری A) دما و زمان نگهداری در دمای آستنیته با دسته دوم (سری B) یکسان بوده، اما تسمه‌های سری A، به دلیل سردشدن در بیرون از کوره، با سرعت و نرخ بیشتری سرد شدند؛ بنابراین دانه‌های ریزتری نسبت به سری B حاصل شد. اما در تسمه‌های سری C دمای آستنیته بالاتر بوده و زمان نگهداری تسمه‌ها در دمای آستنیته بیشتر از دو سری دیگر بوده و در نتیجه تسمه‌ها با نرخ کندتری در داخل کوره سرد شدند. بنابراین، با درنظر گرفتن عوامل بیان‌شده، بزرگ‌ترین اندازه دانه در سری C حاصل خواهد شد.

شکل ۲ سیکل عملیات حرارتی انجام‌شده بر روی تسمه‌ها را نشان می‌دهد.

به منظور جلوگیری از اعوجاج تسمه‌ها در فرایند عملیات حرارتی و همچنین برای حذف اعوجاج اولیه و بالابردن مقدار تختی و مستقیم‌بودن نمونه‌ها، تسمه‌های المن در داخل دو بلوک فولادی ضخیم مهار شدند و توسط چهار عدد پیچ M10 با اعمال گشتاور یکسان (توسط ترک‌متر) سفت شدند (شکل ۳).



شکل ۲ سیکل عملیات حرارتی انجام‌گرفته بر روی تسمه‌ها



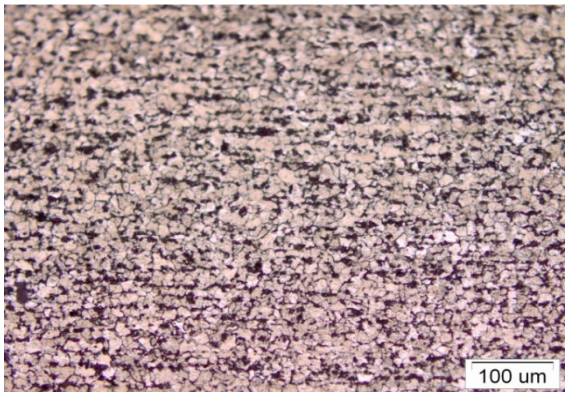
شکل ۳ قید ساخته‌شده برای جلوگیری از اعوجاج تسمه‌ها

پس از انجام عملیات حرارتی، نمونه‌های متالوگرافی از تسمه‌های المن تهیه گردید و پس از برش نمونه‌ها با وایرکات، آنها را داخل مانت گرم قرار داده و عملیات سمباده‌زنی و پولیش برای رسیدن به سطح صاف و قابل آنالیز انجام شد.

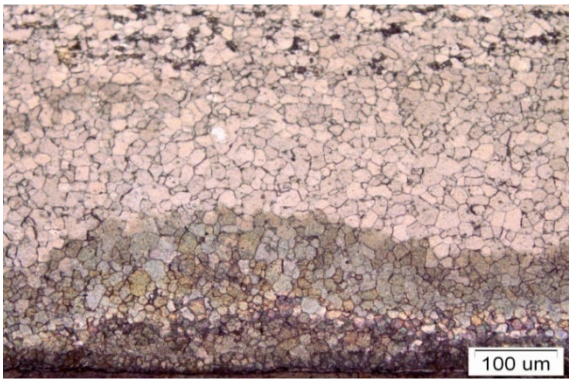
با استناد به استاندارد ASM، محلول نایتال ۳ درصد برای اچ کردن نمونه‌ها استفاده گردید و نمونه‌ها به مدت ۴۵ ثانیه در داخل محلول قرار داده شدند و آنالیز تصویری از نمونه‌ها به عمل آمد. تصاویر به‌دست آمده از سطح نمونه‌ها در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، در تسمه‌های سری A کوچک‌ترین اندازه دانه به‌دست آمد و در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]

نمونه‌های سری B اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر شده و در تسمه‌های سری C بزرگ‌ترین اندازه به‌دست آمده است و این نتایج با پیش‌بینی انجام شده تطابق دارد.



شکل ۴ آنالیز تصویری از سطح تسمه سری A با میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر



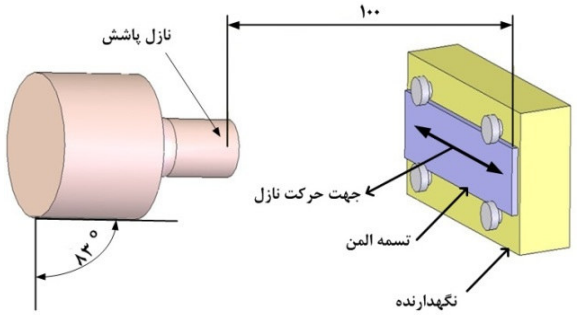
شکل ۵ آنالیز تصویری از سطح تسمه سری B با میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر

شکل ۶ آنالیز تصویری از سطح تسمه سری C با میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر

۴-۲- شات پینینگ تسمه‌ها

عملیات شات پینینگ تسمه‌ها با دستگاه ساخت شرکت ری‌مهر انجام شد. متغییرهای تنظیم‌شده در این عملیات عبارت‌اند از: زاویه نازل نسبت به تسمه‌ها، فاصله نازل از تسمه‌ها، فشار ساچمه‌زنی و زمان پاشش ساچمه‌ها.

بر اساس استاندارد ASM[۱۶]، فاصله نازل پاشش از تسمه‌ها ۱۰۰ میلی‌متر، زاویه نازل از تسمه‌ها برابر با ۸۳ درجه و فشار پاشش ۸۰ بار تنظیم شد. زوایا و فواصل تنظیم‌شده در عملیات شات‌پینینگ در شکل ۷ دیده می‌شود.



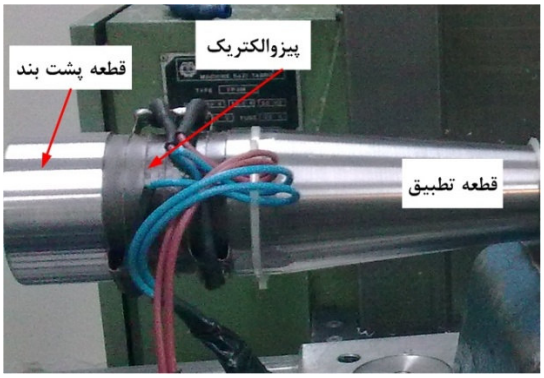
شکل ۷ موقعیت تسمه المن در عملیات شات‌پینینگ

۴-۳- تنش‌گیری اولتراسونیک

برای تنش‌گیری تسمه‌های المن، از ترانسدیوسر پیزوالکتریکی پرقدرت ۳۰۰۰ وات استفاده شد. در این ترانسدیوسر، با توجه به اینکه ماکزیمم توان مجاز منتقل‌شده توسط هر رینگ پیزوالکتریک بین محدوده ۱۵ تا ۳۰ وات بر سانتی‌متر مربع است[۱۷]، هر کدام از پیزوالکتریک‌ها با توجه به سطح مقطع آن‌ها حداکثر ۵۰۰ وات انرژی را می‌توانند انتقال دهند. بنابراین برای انتقال ۳۰۰۰ وات انرژی ۶ عدد پیزوالکتریک نیاز است و در ترانسدیوسر استفاده‌شده از ۶ عدد پیزوالکتریک برای ایجاد ارتعاشات اولتراسونیک با توان ۳۰۰۰ وات استفاده شده است. در ترانسدیوسر استفاده‌شده برای افزایش دامنه ارتعاشات، هورن مخروطی به‌کار رفته و فرکانس رزونانس مجموعه پیزوالکتریک‌ها، قطعه پشت‌بند و تطبیق برابر ۲۴۹۳۰ هرتز است. ترانسدیوسر استفاده‌شده برای تست‌های تنش‌گیری، که در دانشگاه امیرکبیر ساخته شده، در شکل ۸ نشان داده شده است. ژنراتور استفاده‌شده برای ایجاد نوسان در پیزوالکتریک‌ها، از نوع AMMM-2000 ساخت شرکت ام پی آی اولتراسونیک[1] است.

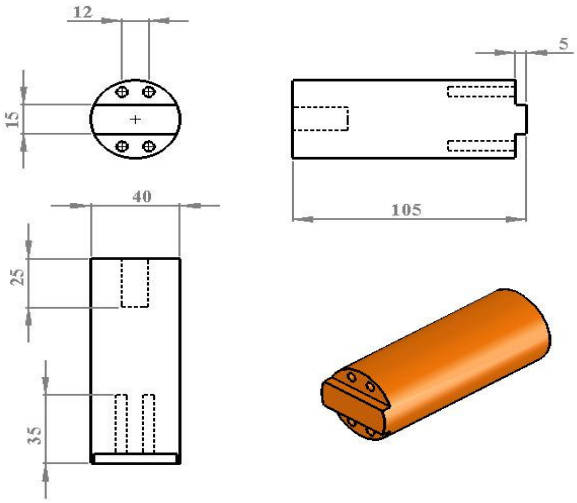
1. MPI-Ultrasonic

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]



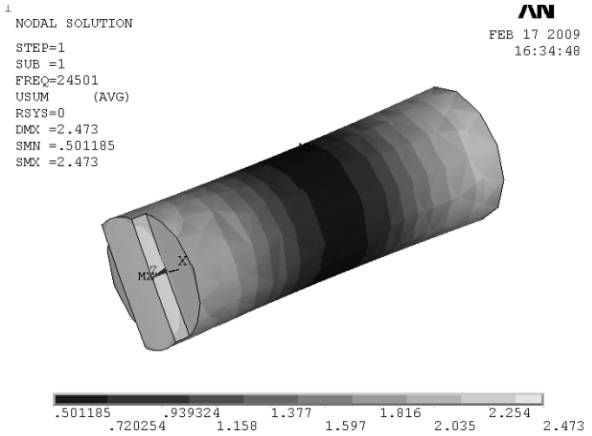
شکل ۸ ترانسدیوسر استفاده‌شده برای تنش‌گیری

با توجه به اینکه در عملیات تنش‌گیری اولتراسونیک باید ارتعاشات را از قسمت کله‌گی ترانسدیوسر اولتراسونیک به قطعه مورد نظر انتقال داد، لذا هر قدر اتلاف انرژی ارتعاشی کمتر باشد، راندمان تنش‌گیری افزایش می‌یابد. انرژی اتلاف‌شده در انتقال ارتعاشات به تسمه المن به صورت گرما هدر رفته و در مواقعی سبب گرم‌شدن اجزای ترانسدیوسر می‌شود. بنابراین، انتقال ارتعاشات به تسمه المن باید به درستی انجام شود و از اتلاف انرژی ارتعاشی جلوگیری شود. هورن طراحی شده برای این منظور در شکل ۹ دیده می‌شود.



شکل ۹ هورن طراحی‌شده برای اعمال ارتعاشات به نمونه (واحدها به میلی‌متر)

با توجه به مباحث مطرح شده، هورن لازم برای انتقال ارتعاشات از سر کله‌گی ترانسدیوسر اولتراسونیک به تسمه المن طراحی شد و در نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی گردید. با توجه به اینکه سر کله‌گی ترانسدیوسر اولتراسونیک شکم ارتعاشی است، بنابراین طول هورن طراحی‌شده نیز $\lambda/2$ درنظر گرفته شد تا سر هورن نیز شکم ارتعاشی بوده و ارتعاشات با بیشترین دامنه به تسمه المن انتقال یابد. در شبیه‌سازی FEM انجام گرفته برای تحلیل ارتعاشاتی هورن تنش‌گیری (شکل ۱۰)، از المان[1] سه‌بعدی و خصوصیات آلیاژ Al 7075-T6 استفاده شد و با توجه به نتیجه تحلیل انجام‌شده، برای فرکانس رزونانس ۲۴۵۰۰ هرتز، طول هورن ۱۰۵/۳۰۱ میلی‌متر به‌دست آمد و هورن تنش‌گیری از جنس آلیاژ Al 7075-T6 ساخته شد. ابعاد هورن طراحی‌شده در شکل ۹ دیده می‌شود.



شکل ۱۰ تحلیل ارتعاشی FEM برای به‌دست آوردن ابعاد هورن تنش‌گیری

پارامترهای بررسی‌شده در تنش‌گیری عبارت است از:

- دامنه ارتعاشات
- نیروی پیش‌بار
- زمان تنش‌گیری
- اندازه دانه‌های کریستالی فلز

برای بررسی اثر دامنه ارتعاشات، سه تراز جریان ورودی استفاده شد و به این ترتیب سه دامنه مختلف اعمال شد. برای اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات از سنسور القایی مدل AEC-5506 ساخت شرکت اپلاید الکترونیکس[2] استفاده شد و بر اساس کالیبراسیون سنسور القایی مقدار خروجی سنسور برابر با ۰/۴ میلی‌متر بر ولت بوده است. مقادیر خوانده‌شده از سنسور القایی ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ میلی‌ولت است که بر اساس کالیبراسیون سنسور، دامنه ارتعاشات به‌ترتیب ۴ و ۶ و ۸ میکرون به‌دست آمد.

1. Solid95
2. Applied electronics

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]

شکل ۱۱ چیدمان استفاده‌شده در تنش‌گیری اولتراسونیک و محل قرارگرفتن سنسور القایی را نشان می‌دهد. بررسی اثر زمان عملیات بر روی راندمان تنش‌گیری در سه تراز انجام شد و از زمان‌های ۲، ۵ و ۸ دقیقه استفاده شد. تاثیر نیروی پیش‌بار بر روی راندمان تنش‌گیری، در دو تراز بررسی شد و برای اعمال نیروی پیش‌بار پیچ‌های سفت‌کننده با دو گشتاور ۵ و ۱۰ نیوتن‌متر سفت شدند. بنابراین، با توجه به رابطه (۳)، که رابطه بین گشتاور اعمالی به پیچ و نیروی محوری اعمالی از طرف پیچ را بیان می‌کند، مقدار نیروی پیش‌بار محاسبه شد[۱۸].

$$F = \left(\frac{2T}{d_m}\right).\left(\frac{\pi d_m - fl}{l + \pi f d_m}\right) \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، T گشتاور وارد به پیچ‌ها، d_m قطر متوسط پیچ‌ها، f ضریب اصطکاک و l گام پیچ است. با توجه به رابطه (۳) نیروی پیش‌بار محاسبه شده برابر با ۴ و ۸ کیلونیوتن است.

در این تحقیق، طراحی آزمایش‌ها به صورت فول فاکتوریل انجام گرفته و با انجام ۵۴ عدد تست تنش‌گیری، اثر همه پارامترها بررسی شده است (جدول ۳).

جدول ۳ تعداد تراز هر پارامتر

پارامتر	تعداد تراز
اندازه دانه‌ها	۳ تراز
دامنه ارتعاشات اولتراسونیک	۳ تراز
نیروی پیش‌بار	۲ تراز
زمان تنش‌گیری	۳ تراز
تعداد کل تست‌ها	۳×۳×۲×۳=۵۴

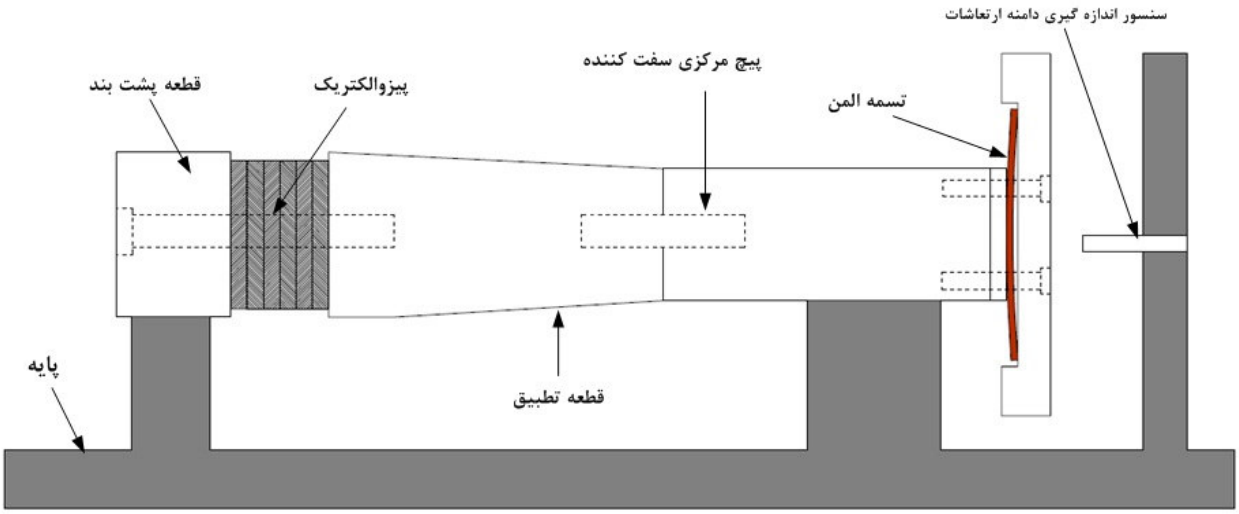
پس از تنش‌گیری نمونه‌ها، نتایج اندازه‌گیری تنش‌پسماند در نمونه‌های تنش‌گیری شده و تنش‌گیری نشده مقایسه، و مقدار کاهش تنش‌های پسماند از این طریق محاسبه شد.

۵- نتایج

۵-۱- نتایج تست شات پینینگ

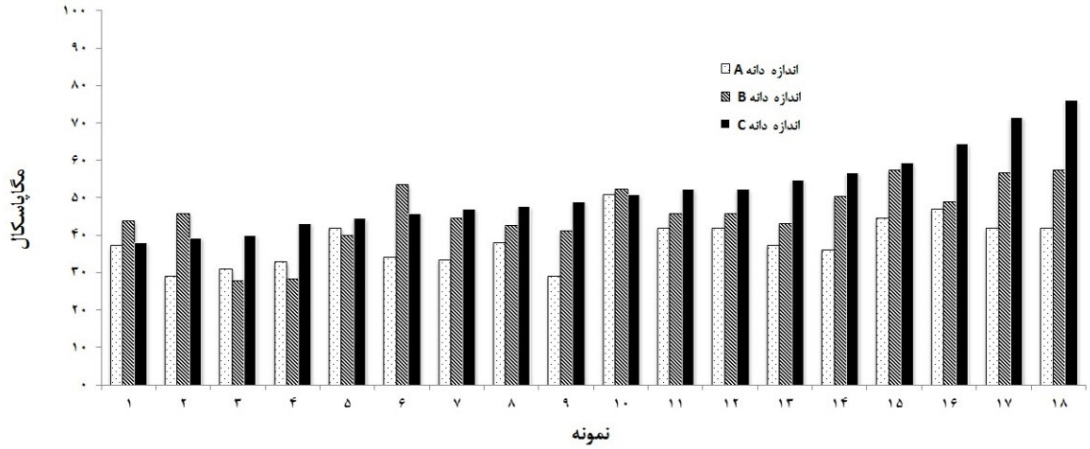
نتایج به‌دست آمده از عملیات شات‌پینینگ تسمه‌های المن پس از محاسبه در شکل ۱۲ آمده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، تسمه‌های با اندازه دانه بزرگ‌تر تنش پسماند بیشتری در خود ذخیره می‌کنند. میانگین تنش‌های پسماند ذخیره‌شده در تسمه‌های المن در جدول ۴ دیده می‌شود. به‌نظر می‌رسد تسمه‌های با دانه‌های ریزتر مرز دانه بیشتری داشته و مقاومت بیشتری در مقابل تغییر شکل و حرکت نابجایی‌ها از خود نشان می‌دهند و تسمه‌های با دانه‌بندی درشت‌تر از مرز دانه کمتری برخوردار بوده و تنش پسماند بیشتری در خود ذخیره می‌کنند.

آزمایش‌های متالوگرافی تسمه‌ها در حالت قبل و بعد از شات‌پینینگ نشان می‌دهد که دانه‌های کریستالی در نزدیکی سطح تسمه‌ها، که در معرض پاشش بوده‌اند، تغییر شکل یافته و از حالت اولیه خود خارج شده‌اند. بنابراین، می‌توان از روی شکل دانه‌ها به تغییر توزیع تنش پسماند پی برد. شکل ۱۳ آنالیز تصویری سطح تسمه المن را در دو حالت قبل و بعد از شات‌پینینگ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ شماتیک چیدمان استفاده‌شده برای تنش‌گیری اولتراسونیک

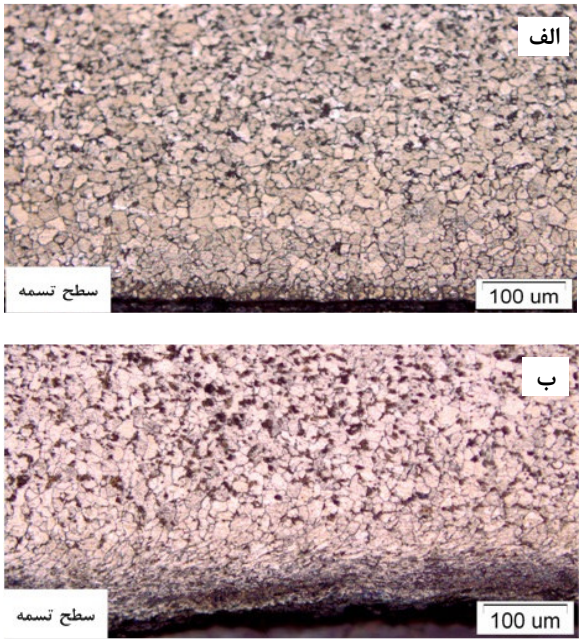
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]



شکل ۱۲ تنش‌های پسماند حاصل از شات‌پینینگ

جدول ۴ میانگین مقدار تنش‌های پسماند محاسبه‌شده

	میانگین تنش پسماند در تسمه‌ها(MPa)
تسمه نوع A	۳۸/۳۵
تسمه نوع B	۴۵/۸۳
تسمه نوع C	۵۱/۸۱



شکل ۱۳ آنالیز تصویری تسمه سری A با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر الف: قبل از عملیات شات‌پینینگ، ب: بعد از عملیات شات‌پینینگ

در محاسبات انجام شده، مقدار اولیه انحناء تسمه‌ها از مقدار انحناء نهایی آن‌ها پس از عملیات تنش‌گیری کم شد تا اثر خالص تنش‌گیری در تغییر انحناء دیده شود.

۵-۲- نتایج تست تنش‌گیری اولتراسونیک

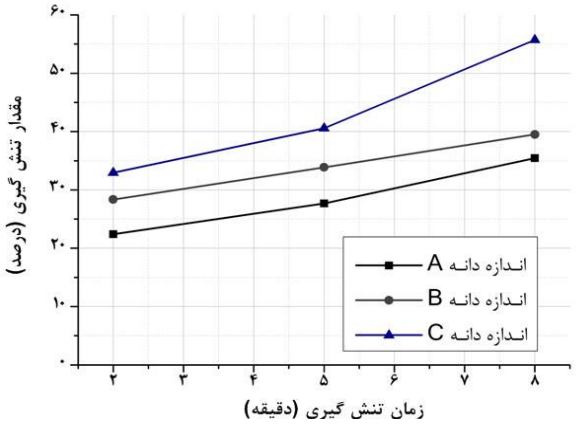
۵-۲-۱- اثر اندازه دانه‌ها

در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ اثر اندازه دانه‌ها در راندمان تنش‌گیری اولتراسونیک نشان داده شده است.

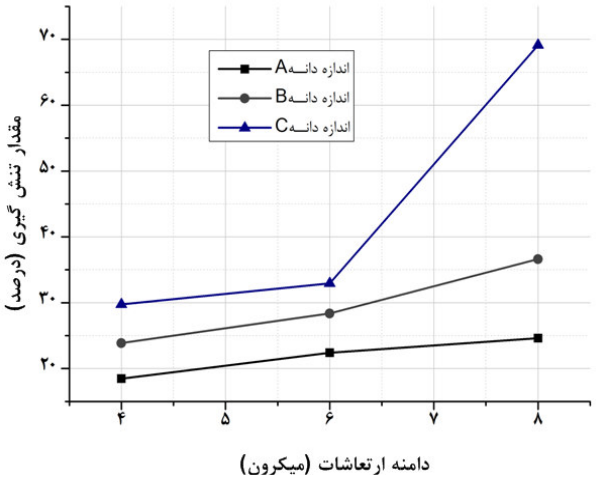
برای بررسی اثر اندازه دانه‌ها بر روی مقدار تنش‌گیری و تحلیل نمودارها، آنالیز واریانس یک‌طرفه با نرم‌افزار SPSS16 انجام گرفت و نتایج نشان داد که میانگین مقدار تنش‌گیری در دانه‌های با اندازه A برابر با ۲۶/۵ درصد و میانگین تنش‌گیری در نمونه‌های با اندازه دانه B برابر با ۳۱/۵ درصد است. مقدار ضریب آماری P بین دو اندازه دانه A و B برابر با ۰/۳۲۸ است که کوچک‌تر از ۰/۰۵ نیست؛ پس می‌توان گفت تفاوت معنی‌داری بین نتایج این دو اندازه دانه دیده نمی‌شود. اما میانگین تنش‌گیری نمونه‌های با اندازه دانه C ۴۵/۲۶ درصد است و ضریب آماری P بین اندازه دانه B و C برابر ۰/۰۰۱ است؛ بنابراین تفاوت معنی‌داری بین نتایج این گروه نمونه‌ها وجود دارد و با افزایش اندازه دانه از B به C مقدار تنش‌گیری افزایش یافته است.

همچنین، آزمون رگرسیون خطی برای بررسی بیشترین و کمترین تاثیر پارامترها بر روی مقدار تنش‌گیری انجام گرفت و صحت آن تایید شد. با توجه به اینکه مقدار ضریب استاندارد شده β برای پارامتر اندازه دانه برابر با ۰/۶۰۸ است، لذا این عامل بیشترین تاثیر را در مقدار تنش‌گیری دارد. افزایش مقدار تنش‌گیری با افزایش اندازه دانه‌ها از A به B و سپس افزایش اندازه دانه از B به C در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ دیده می‌شود.

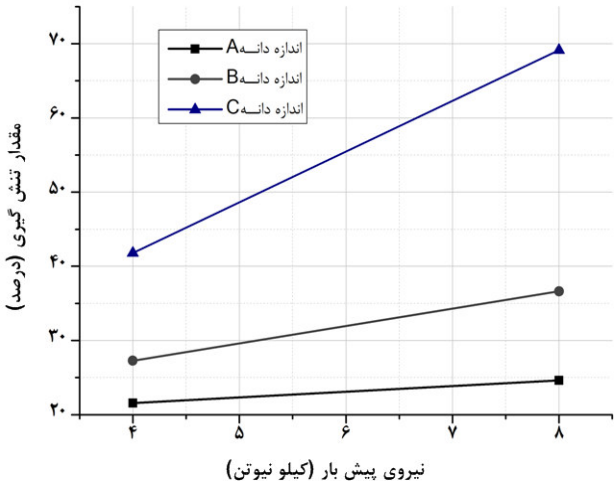
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]



شکل ۱۴ اثر اندازه دانه‌ها در مقدار کاهش تنش‌های پسماند (پیش‌بار ۸ کیلو نیوتن و دامنه ارتعاشات ۶ میکرون)



شکل ۱۵ اثر اندازه دانه‌ها در مقدار کاهش تنش‌های پسماند (پیش‌بار ۸ کیلو نیوتن و زمان تنش‌گیری ۲ دقیقه)



شکل ۱۶ اثر اندازه دانه‌ها در راندمان تنش‌گیری با پیش‌بارهای متفاوت (زمان تنش‌گیری ۲ دقیقه و دامنه ارتعاشات ۸ میکرون)

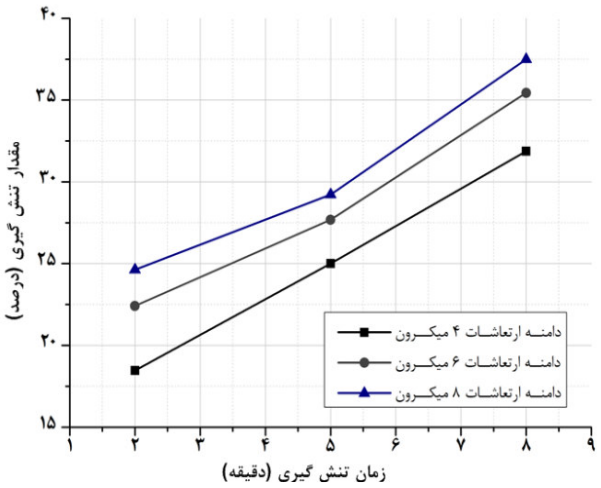
افزایش مقدار تنش‌گیری با بزرگ‌شدن اندازه دانه‌ها را می‌توان به کاهش مرز دانه‌ها و کاهش تجمع نابجایی‌ها در روی مرز دانه‌ها نسبت داد. با کاهش نابجایی‌ها، لغزش و همچنین حرکت آن‌ها آسان شده و تنش‌گیری بیشتری انجام می‌گیرد.

۵-۲-۲- اثر زمان تنش‌گیری

تحلیل آماری نتایج به‌دست آمده نشان داد که میانگین تنش‌گیری انجام‌شده با اعمال زمان ۲ دقیقه ۲۸/۱ درصد بوده و میانگین تنش‌گیری با اعمال زمان ۵ دقیقه برابر با ۳۴/۶ درصد و همچنین میانگین تنش‌گیری با اعمال زمان ۸ دقیقه برابر با ۴۰/۶ درصد است.

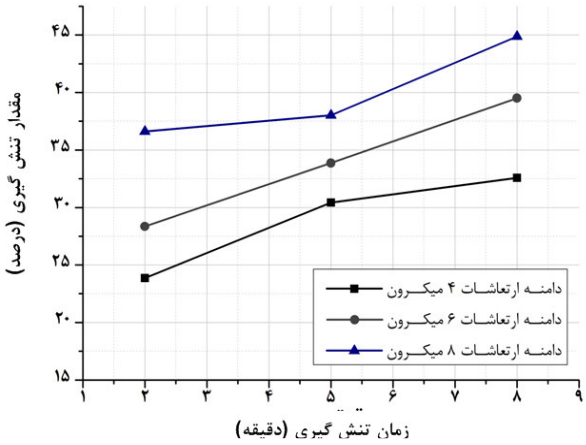
با توجه با اینکه مقدار ضریب آماری P، بین زمان‌های ۲ و ۵ دقیقه، برابر با ۰/۲۶۹ و بین زمان‌های ۲ و ۸ دقیقه برابر با ۰/۰۱۱ است، بنابراین تفاوت معنی‌داری بین نتایج تنش‌گیری در دو گروه ۲ و ۵ دقیقه دیده نمی‌شود و نمی‌توان گفت با افزایش زمان از ۲ دقیقه به ۵ دقیقه تنش‌گیری افزایش یافته است، اما می‌توان گفت، با افزایش زمان تا ۸ دقیقه، مقدار تنش‌گیری افزایش یافته است و این افزایش معنی‌دار بوده است.

با افزایش زمان تنش‌گیری، زمان برای جابه‌جایی و حرکت نابجایی‌ها فراهم می‌شود و این امر منجر به کاهش نابجایی‌ها و در نتیجه کاهش تنش‌های پسماند می‌شود. تاثیرهای بیان‌شده در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ دیده می‌شود.

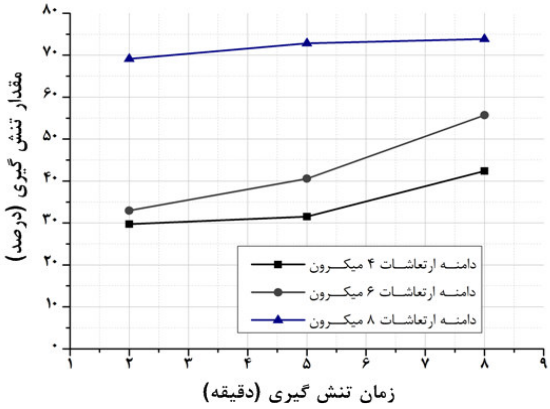


شکل ۱۷ اثر زمان تنش‌گیری در راندمان تنش‌گیری برای قطعات سری A (پیش‌بار ۸ کیلو نیوتن)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]



شکل ۱۸ اثر زمان تنش‌گیری در راندمان تنش‌گیری برای قطعات سری B (پیش‌بار ۸ کیلو نیوتن)

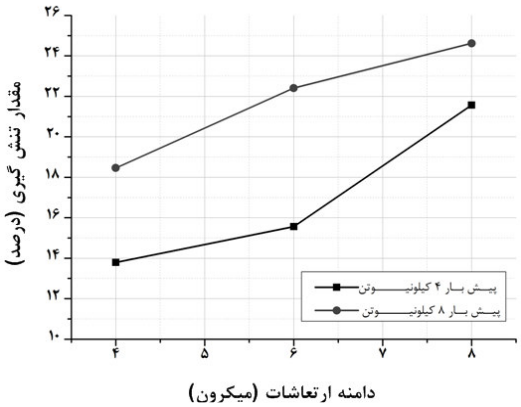


شکل ۱۹ اثر زمان تنش‌گیری در راندمان تنش‌گیری برای قطعات سری C (پیش‌بار ۸ کیلو نیوتن)

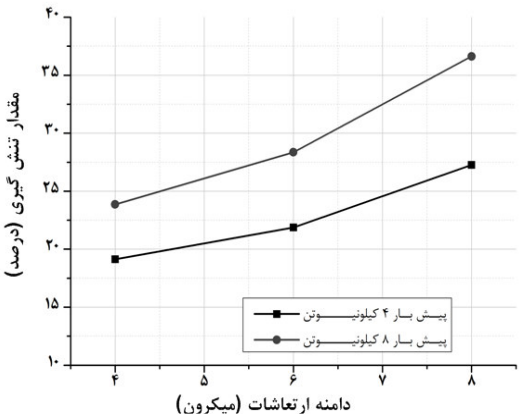
۵-۲-۳- اثر دامنه نوسانات اولتراسونیک

میانگین مقدار تنش‌گیری برای حالتی که دامنه ارتعاشات ۴ میکرون است برابر با ۲۸/۸ درصد بوده و به ترتیب برای دامنه ۶ میکرون برابر با ۳۲/۶ درصد و برای دامنه ۸ میکرون برابر با ۴۱/۸ درصد است. آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که افزایش مقدار تنش‌گیری از ۲۸/۸ درصد به ۳۲/۶ درصد معنی‌دار نیست، ولی افزایش مقدار تنش‌گیری از ۲۸/۸ درصد به ۴۱/۸ درصد معنی‌دار است و مقدار ضریب آماری P برای این حالت ۰/۰۰۷ است. برای بررسی صحت آزمون آماری از آزمون تعقیبی شفه[1] استفاده شد. پس می‌توان گفت افزایش دامنه ارتعاشات، در بازه ۴ الی ۸ میکرون، مقدار تنش‌گیری را افزایش می‌دهد. این اثر را می‌توان به دامنه حرکت نابجایی‌های نهفته در داخل نمونه‌ها نسبت داد که با افزایش دامنه حرکت نابجایی‌ها، مقدار حرکت نهایی آن‌ها افزایش یافته و مقدار تنش‌گیری افزایش می‌یابد.

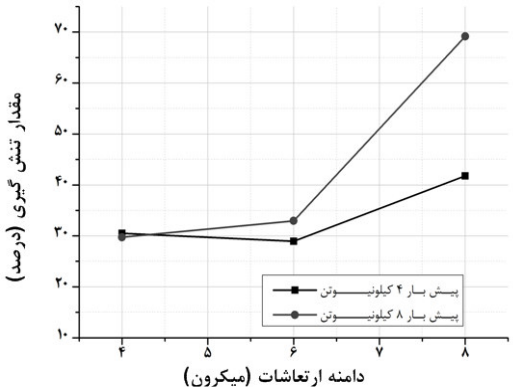
در شکل‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲، تاثیر دامنه ارتعاشات بر روی مقدار تنش‌گیری به صورت نمودار دیده می‌شود.



شکل ۲۰ تاثیر دامنه ارتعاشات بر راندمان تنش‌گیری در پیش‌بارهای مختلف در تسمه سری A (زمان ۲ دقیقه)



شکل ۲۱ تاثیر دامنه ارتعاشات بر راندمان تنش‌گیری در پیش‌بارهای مختلف در تسمه سری B (زمان ۲ دقیقه)



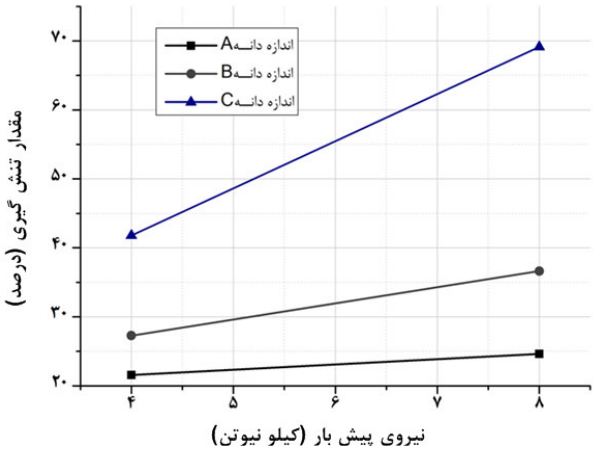
شکل ۲۲ تاثیر دامنه ارتعاشات بر راندمان تنش‌گیری در پیش‌بارهای مختلف در تسمه سری C (زمان ۲ دقیقه)

1. Scheffe

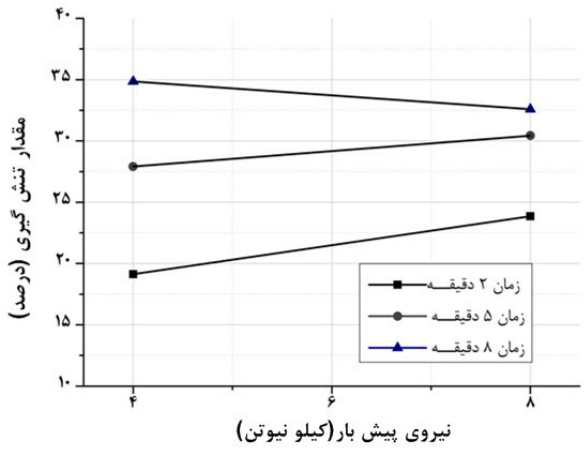
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]

۵-۲-۴- اثر نیروی پیش‌بار

آزمون رگرسیون خطی نشان داد که نیروی پیش‌بار به صورت معنی‌داری بر روی مقدار تنش‌گیری اثر دارد (شکل ۲۳ و ۲۴) و مقدار ضریب استاندارد شده β برای این پارامتر برابر با ۰/۲۳ است؛ لذا نیروی پیش‌بار کمترین اثر را در بین چهار پارامتر بررسی‌شده دارد. افزایش نیروی پیش‌بار سبب بالارفتن سفتی مجموعه آزمایشی می‌شود. بنابراین اتلاف انرژی اولتراسونیک به گرما کاهش یافته و راندمان تنش‌گیری افزایش می‌یابد. در چند آزمایش که با اعمال پیش‌بارهای کمتر انجام شد، دیده شد که تمام یا قسمت اعظمی از انرژی اولتراسونیک در محل اتصال نمونه با هورن به گرما تبدیل می‌شود.



شکل ۲۳ تاثیر نیروی پیش‌بار در راندمان تنش‌گیری (زمان تنش‌گیری ۲ دقیقه و دامنه ارتعاشات ۸ میکرون)



شکل ۲۴ تاثیر نیروی پیش‌بار در راندمان تنش‌گیری (برای قطعات C با دامنه ارتعاشات ۴ میکرون)

۶- نتیجه‌گیری

تحلیل آماری بر روی نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش پسماند نشان داد که اندازه دانه‌ها بیشترین اثر را در مقدار تنش‌گیری دارد. این تاثیر را می‌توان از ضریب استاندارد شده β، که برای اندازه دانه‌ها ۰/۶۰۸ است، استنباط کرد. همچنین، تحلیل واریانس بین سه اندازه دانه مختلف نشان داد که بین نتایج حاصل از نمونه‌هایی با اندازه دانه A و C تفاوت معنی‌داری وجود دارد و می‌توان گفت با افزایش اندازه دانه‌ها مقدار تنش‌گیری افزایش یافته است.

مقدار ضریب β برای پارامتر دامنه ارتعاشات برابر با ۰/۴۲۰ است؛ لذا در رتبه دوم اثرگذاری قرار دارد و به‌ترتیب، برای دامنه‌های ۴، ۶ و ۸ میکرون، مقدار میانگین تنش‌گیری برابر با ۲۸/۸، ۳۲/۶ و ۴۱/۸ درصد است. تحلیل واریانس یک طرفه با آزمون تعقیبی شفه نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین نتایج کمترین و بیشترین دامنه دیده می‌شود و معنی‌دار نبودن نتایج بین دامنه ۴ و ۶ میکرون نشان می‌دهد که این دامنه‌ها نزدیک به هم بوده است.

زمان تنش‌گیری سومین پارامتر تاثیرگذار در مقدار تنش‌گیری است و ضریب استاندارد شده β برای این متغیر ۰/۴۰۴ است و با اعمال زمان‌های ۲، ۵ و ۸ دقیقه، به طور میانگین، ۲۸/۱، ۳۴/۶ و ۴۰/۶ درصد تنش‌گیری انجام شده است.

بزرگ‌شدن اندازه دانه‌ها سبب ازبین رفتن و کاهش مرز دانه‌ها شده و از تجمع نابجایی‌ها کاسته شده و حرکت آن‌ها تسهیل می‌شود. همچنین، افزایش دامنه ارتعاشات نیز سبب کاهش نابجایی‌ها شده و مقدار تنش‌گیری را افزایش می‌دهد. به طور کلی می‌توان گفت آزادشدن تنش‌ها در نمونه‌های فلزی به پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی مواد ارتباط دارد که در این پدیده، نابجایی‌ها و حرکت آن‌ها نقش اساسی دارند. هر عاملی که بتواند حرکت نابجایی‌ها را تسهیل کند، به نرم‌شدگی آکوستیکی و آزادشدن تنش‌ها کمک می‌کند.

۷- مراجع

[1] McGoldrick R.T., "Experiments in Stress Relieving Castings and Welded Structures by Vibration", *Journal of the American Society of Naval Engineers*, Vol. 25, No. 4, 1943, pp. 589s-609s.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]

[2] Wozney G. P., Crawmer G. R., "An Investigation of Vibrational Stress Relief in Steel", *Welding Journal*, Vol. 47, No. 9, 1968, pp. 411s-418s.

[3] Lokshin I. Kh, "Vibration Treatment and Dimensional Stabilization of Castings", *Russian Castings Production Journal*, Vol. 7, 1965, pp. 454-456.

[4] Dawson R., Moffat D. G., "Vibratory Stress Relief: A Fundamental Study of Its Effectiveness," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 102, 1980, pp. 169s-178s

[5] Walker C. A., Waddell A. J., Johnston D. J., "Vibratory Stress Relief - an Investigation of the Underlying Processes", *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 209, 1995, pp. 51-58.

[6] Luh G. C., Hwang R. M., Evaluating the Effectiveness of Vibratory Stress Relief by a Modified Hole-Drilling Method", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, 1998, pp. 815-823.

[7] Munsi S. M. Y., Waddell A. J., Walker C. A., "The Influence of Vibratory Treatment on the Fatigue Life of Welds: A Comparison with Thermal Stress Relief", *International journal of Strain*, Vol. 37, 2001, pp. 141-149.

[8] Sun M. C., Sun Y. H., Wang R. K., "Vibratory Stress Relieving of Welded Sheet Steels of Low Alloy High Strength Steel", *Material letters*, Vol. 58, 2004, pp. 1396-1399

[9] Hirai S., Aoki Sh., "Reduction of Residual Stress by Ultrasonic Surface Vibration", *Advances in Vibration Engineering*, Vol. 7, No. 2, 2005, pp. 207-216.

[10] Liqun D., Qijia W., "Experimental Study on Ultrasonic Stress Relief for Cured SU-8 Photoresist Layer", *Microelectronic Engineering*, Vol. 87, 2010, pp. 2555-2560

[11] Walton H. W., *Deflection Methods to Estimate Residual Stress, Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, Ohio, ASM International, 2002, pp. 11-26.

[12] *ASM Handbook*, Vol. 1, Ohio, ASM international, 2004, p. 700.

[13] *ASM Handbook*, Vol. 4, Ohio, ASM international, 2004, pages 81,102

[14] *ASM Handbook*, Vol. 5, Ohio, ASM international, 2004, p. 302

[15] Simpson R. S., Clark D. O., Chiasson G. L., "The Effect on Inherent Tolerances in the Almen Test Strips on Shot Peening Process Reliability", *Advanced Material Process Corporation*, Wayne, USA, pp. 101-107.

[16] *ASM Handbook*, Vol. 5, Ohio, ASM international, 2004, pp. 297-302

[17] Abdullah A., Shahini M., Pak A., "An Approach to Design a High Power Piezoelectric", *Journal of Electroceram*, Vol. 22, 2009, pp. 369-382.

[18] Shigley J. E., *Mechanical Engineering Design*, 8th Ed., New York, McGraw-Hill, 2008, p. 423.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.13.4]