

بررسی تجربی و تئوریک اثر اندازه دانه فولاد S355J2 بر پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی

میرداود حسینی¹، مقصود شلوندی^{2*}، آیدین سلیمیا³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران

* صندوق پستی 5166615471، mshalvandi@tabrizu.ac.ir

چکیده

هدف اصلی این مقاله آشکارسازی تاثیر حجمی ارتعاشات اولتراسونیک (تأثيراتی که محدود به سطح نبوده و انرژی ارتعاشی در حجم فلز اثر با اندازه دانه‌های متفاوت بوده و مقدار کاهش استحکام تسلیم و نهایی این نمونه‌های S355J2 می‌کند) بر رفتار پلاستیکی نمونه‌های فولاد میکرون توسط انجام سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی 10، 35، 60 فولادی بررسی می‌گردد. جهت این بررسی، نمونه‌هایی با اندازه دانه‌های نرمالیزاسیون و آنلینگ ایجاد گردید و یک سیستم آزمایشگاهی مناسب جهت انجام تست کشش همراه با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با میلی‌متر بردقیقه در دمای اتاق انجام گردید و مشخص شد که با 1 وات طراحی و ساخته شد. تست کشش با سرعت 195، 390 توان‌های و 8%، 18%، 27% میکرون به ترتیب به اندازه 10، 35، 60 وات، استحکام تسلیم نمونه‌های فولادی با اندازه دانه 390 اعمال ارتعاشات با توان کاهش می‌یابد. با توجه به این که طول مرزدهانه‌ها در نمونه‌های ریزدانه بیشتر از نمونه‌های درشت دانه تر می‌باشد لذا انرژی صوتی در 27% طول مرزدهانه بیشتر پخش می‌شود بنابراین تاثیر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک در نمونه‌های ریزدانه کمتر از نمونه‌های درشت دانه بوده و نهایی نمونه‌های ریزدانه کاهش کمتری از خود نشان دادند. استحکام تسلیم و

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 بهمن 1396

پذیرش: 02 اردیبهشت 1397

ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

ارتعاشات اولتراسونیک

تست کشش

نرم‌شدگی آکوستیکی

ریزساختار

Experimental and Theoretical evaluation of the Effect of Grain size of S355J2 on Acoustic Softening

Mir Davoud Hosseini¹, Maghsoud Shalvandi^{1*}, Aydin Salimiasl²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

* P.O.B. 5166616471 Tabriz, Iran, mshalvandi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 February 2018
Accepted 22 April 2018
Available Online 17 May 2018

Keywords:

Ultrasonic vibration
Tensile Test
Acoustic Softening
Grain size

ABSTRACT

The main purpose of this paper is to reveal the volume effect of ultrasonic vibrations on the plastic behavior of S355J2 steel specimens with different grain sizes and investigate the decrease in the Yield strength and ultimate strength of these steel specimens. For this study, samples of grain size of 10, 35 and 60 microns were created by performing various cycles of normalization and annealing heat treatments. An experimental setup was designed and developed for the tensile test with ultrasonic vibration. The tensile test performed at room temperature and constant speed of 1 mm/min and it found that by applying 390 watts of vibrations, the yield strength reduction of steel specimens with a grain size of 10, 35 and 60 microns was 8%, 18% and 27%, respectively. The grain boundary length of fine-grain specimens is greater than the coarse-grain specimens, therefore, the sound energy are distributed over the boundary. Therefore, the effect of applying ultrasonic vibrations on fine-grain specimens is less than that of the largest grains and the yield strength and ultimate strength of fine-grain specimens showed a lower reduction.

1- مقدمه

نمونه‌های آلومینیومی، برلیومی، تنگستنی و فولادی در تست کشش همراه با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک در محدوده فرکانسی 15-25 کیلوهرتز، توسط این محققین گزارش شده است [2]. ایزومی و همکاران به بررسی تاثیر ارتعاشات اولتراسونیک بروی مس، منیزیم در تست فشار نیز پرداخته اند نتایج حاصله نشان داد که در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک در تست فشار نیز استحکام تسلیم تمامی نمونه‌ها کاهش می‌یابد [3]. تحقیقات بروی رفتار آلومینیوم در تست کشش و فشار همراه با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک توسط لوکاس و همکاران انجام گردیده است [4]. تحقیقات مشابهی بر روی

کاربرد ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیندهای مکانیکی از سال 1390 شروع گردیده است. مطالعات اولیه انجام گرفته پدیده کاهش تنش سیلان مواد بعد از اعمال ارتعاشات اولتراسونیک بر روی نمونه‌های Zn در تست کشش (همراه با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک) را نشان می‌دهند. این پدیده تحت عنوان اثر بلاها¹ شناخته می‌شود [1]. بلاها و لانگنکر بروی تاثیر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک بر پلاستیسیته مواد، تحقیق کردند و کاهش تنش تسلیم

¹ Balaha Effect

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد S355J2

عنصر	C	Mn	Si	Ni
درصد	0.172	0.955	0.314	0.67
عنصر	Mo	Cr	Cu	Fe
درصد	0.052	0.073	0.027	98.251

جدول 2 خواص مکانیکی فولاد S355J2

خواص	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	مدول (Gpa)	تغییر طول (%)
S355J2	353	524	200	37

نرم‌شدگی است، لذا نمونه‌هایی با سه اندازه دانه متفاوت ایجاد شد و جهت نرمالیزه کردن فولاد ریزدانه S355J2، عملیات حرارتی بدین شکل انجام پذیرفت که نمونه آزمون کشش مطابق دیاگرام آهن-کربن فولاد S355J2 تا دمای آستنیتی 860 درجه گرم شد و بعد از رسیدن به این دما و ایجاد فاز آستنیتی، نمونه‌ها به مدت 1 ساعت در این دما نگهداری شدند و سپس از کوره خارج شده و در هوای آزاد خنک شد و فاز فریت و پرلیت ریزتر ایجاد گردید. جهت ایجاد دانه‌های بزرگ‌تر در فولاد S355J2، از عملیات آنیل کامل استفاده گردید. به طوری که نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در کوره، دمایشان مطابق نمودار آهن-کربن تا دمای بالاتر از دمای آستنیتی یعنی 1050 درجه فولاد بالا برده شد و به مدت 3 ساعت و 45 دقیقه در این دما نگهداری شدند. بعد از ایجاد فاز آستنیتی در این نمونه‌ها کوره خاموش گردید و نمونه‌ها بدون این که از کوره خارج شوند در داخل کوره درب بسته به مدت 20 ساعت تا رسیدن به دمای محیط و ایجاد فاز فریت و پرلیت و دانه‌بندی درشت‌تر، نگهداری شدند. برای به دست آوردن دانه‌های متوسط از فولاد S355J2، از عملیات آنیل ناقص استفاده شد به طوری که نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در کوره، دمایشان مطابق نمودار آهن-کربن تا دمای آستنیتی فولاد (860 درجه) بالا برده شد و به مدت 2 ساعت در این دما نگهداری شدند و بعد از گذشت این زمان، نمونه‌ها از کوره خارج شده و بیرون از کوره خنک شده و به دمای محیط رسیدند. با توجه به این که نرخ سرعت سرد کردن و زمان نگهداری نمونه‌ها در کوره از پارامترهای مهم در اندازه دانه می‌باشد لذا با انجام این سیکل عملیات حرارتی آنلینگ ناقص، دانه‌های بزرگ‌تر از نرمالیزاسیون و کوچک‌تر از آنلینگ کامل به دست آمد [8]. "شکل 1" سیکل عملیات حرارتی انجام گرفته بر روی نمونه‌های فولاد S355J2 جهت به دست آوردن نمونه‌هایی با اندازه دانه متفاوت را نشان می‌دهد.

همچنین برای به دست آوردن اندازه دانه‌ها و اندازه‌گیری آن‌ها نمونه‌های متالوگرافی از نمونه‌ها تهیه شد که "شکل 2" تصاویر متالوگرافی نمونه‌های فولاد S355J2 بعد از انجام سیکل‌های عملیات حرارتی مختلف را نشان می‌دهد.

2-3- تحلیل و طراحی نمونه آزمون کشش

در این پژوهش از ترانسدیوسر با توان 1 کیلووات و فرکانس رزونانس 20 kHz برای ایجاد و انتقال ارتعاشات به نمونه فولادی در تست کشش استفاده شد و برای این که حداکثر بازده و همچنین حداکثر انتقال ارتعاشات در نمونه به وجود آید، ابعاد نهایی نمونه توسط تحلیل المان محدود مودال، به گونه‌ای طراحی شد که فرکانس رزونانس نمونه با فرکانس رزونانس ترانسدیوسر، برابر باشد. با توجه به این که ترانسدیوسر مورد استفاده از قبل طراحی و ساخته

فاز Az31 توسط تانگ ون و همکاران گزارش شده است. در این تحقیق، فرکانس کاری 15 کیلوهرتز و توان استفاده شده 2 کیلووات است و پدیده‌های نرم‌شدگی و سخت‌شدگی آکوستیکی توسط تانگ ون مشاهده گردید به طوری که بیان می‌شود در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با دامنه کمتر از حد بحرانی، پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی روی می‌دهد و پدیده سخت‌شدگی آکوستیکی زمانی رخ می‌دهد که دامنه ارتعاشات اولتراسونیک بیشتر از حد بحرانی باشد [5]. شلودنی و همکاران (2012) به بررسی رفتار نرم‌شدگی آکوستیکی مواد در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک پرداختند [6]. در این تحقیق اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک بر روی فولاد کربنی ساده و فولاد ضدزنگ بررسی شده است. دامنه ارتعاشات اعمالی در این تحقیق، برابر با 10 میکرون بوده و از ارتعاشاتی با شدت‌های 42 و 84 وات بر سانتی‌متر مربع برای مرتش کردن نمونه‌های تست کشش استفاده شده است. همچنین مقدار توان استفاده شده توسط این محققین برابر با 300 و 600 وات بوده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با اعمال ارتعاشات 300 وات، تنش تسلیم نمونه‌های فولاد ضدزنگ حداکثر تا 32 درصد و با اعمال ارتعاشات با توان 600 وات، حداکثر تا 44 درصد کاهش می‌یابد [6]. احمدی و همکاران (2015) به بررسی تأثیر اندازه دانه در نرم‌شدگی آکوستیکی آلومینیوم خالص پرداختند. در این تحقیق پس از طراحی هورن مناسب، نمونه‌های آلومینیومی با اندازه دانه‌های 0.97، 7، 15، 38، 109 میکرون تهیه شد و برای اعمال ارتعاشات از فرکانس 20 کیلوهرتز و دامنه ارتعاشات ورودی 5 میکرون انتخاب شد. نتایج نشان داد که در نمونه‌های با اندازه دانه بزرگ (109 میکرون) مقدار کاهش تنش تسلیم 66 درصد و در نمونه‌های با اندازه دانه کوچک‌تر (0.97 میکرون)، مقدار کاهش تنش تسلیم 11.3 درصد است. همچنین برای اندازه دانه‌های 35 میکرون و 15 میکرون مقدار کاهش تنش تسلیم به ترتیب برابر با 56.19 و 29.16 درصد گزارش شد [7]. وانگ و همکاران به بررسی پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی در نمونه‌های مسی با اندازه دانه متفاوت پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تأثیر اعمال ارتعاشات به نمونه‌های ریزدانه بیشتر از نمونه‌های درشت دانه می‌باشد [1] همچنین محققین از یک مدل عددی که بر اساس فعالیت دمایی و پلاستیسیته کریستال مس نوشته شده بود برای شبیه‌سازی عددی پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی استفاده کردند که با نتایج تجربی به دست آمده تطابق خوبی به دست آمد.

در این مقاله وقوع پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی در نمونه‌های فولادی با اندازه دانه متفاوت بررسی شده است و همچنین تأثیر شدت ارتعاشات اعمالی بر پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی نیز بحث شده است.

2- آزمایش‌های تجربی

2-1- انتخاب مواد و تهیه نمونه‌ها

در پژوهش حاضر از فولاد S355J2 برای نشان دادن تأثیر اندازه استفاده شد. فولاد مذکور از پرکاربردترین فولادها در صنایع مختلف از جمله صنایع کشتی‌سازی و صنایع شکل‌دهی ورقی می‌باشد. آنالیز شیمیایی فولاد مورد آزمایش توسط تست کوانتومتری به دست آمد که نتیجه آن در جدول‌های 1 و 2 آورده شده است. پس از تهیه فولاد ذکر شده، نمونه‌ها با استفاده از فرآیند واترجت و با اندازه‌های نشان داده شده در "شکل 4" تهیه شد.

2-2- عملیات حرارتی

با توجه به این که هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر اندازه دانه فولاد بر پدیده

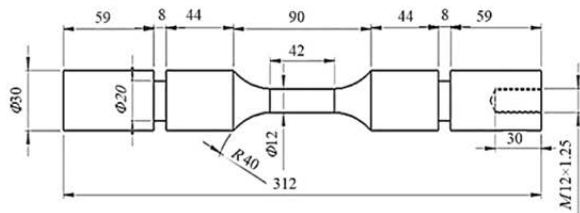


Fig. 4 The Final dimension of Tension specimen

شکل 4 ابعاد نهایی نمونه تست کشش [9]

4-2- انجام تست کشش

با توجه به نتیجه به دست آمده در تحلیل المان محدود که در "شکل 3" آورده شده است و همچنین الزامات طراحی آزمون کشش براساس استاندارد ASTM، نمونه آزمون به صورت "شکل 4" طراحی و ساخته شد. ارتعاشات با توان 390 وات و همچنین 195 وات به نمونه‌ها اعمال گردید برای بررسی پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی در تست کشش، فیکسچر مناسبی جهت گرفتن نمونه‌ها از محل گره‌ها و قرارگیری مناسب ترانسدیوسر و انتقال ارتعاشات با راندمان بالا، به کار گرفته شده است. به منظور یافتن فرکانس رزونانس طولی مجموعه پس از مونتاژ کامل آن جستجوی فرکانسی انجام شد و فرکانس رزونانس طولی 19720 Hz به دست آمد که در "شکل 5" آورده شده است و همچنین "شکل 6" مجموعه آزمایشی تهیه شده را نمایش می‌دهد.

3- نتایج و بحث

پس از این‌که نمونه‌ها با دانه‌بندی‌های متفاوت به صورت جداگانه مورد آزمایش قرار گرفتند، نمودارهای تنش و کرنش در حالت بدون اعمال ارتعاشات اولتراسونیک و همچنین درحالت با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک برای توان‌های ارتعاشی اعمال شده رسم گردید. "شکل‌های 7 تا 9" نشان دهنده تاثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر نمودارهای تنش و کرنش فولاد S355J2 با اندازه دانه‌های متفاوت می‌باشد.

با توجه به این‌که طول کل مرز دانه‌ها در نمونه‌های ریزدانه بیشتر از طول مرز دانه در نمونه‌های درشت‌دانه می‌باشد، بنابراین با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک به نمونه‌های ریزدانه، انرژی بر واحد طول در نمونه‌های ریزدانه کمتر است و ارتعاشات اولتراسونیک در این نمونه‌ها، کمترین اثرگذاری

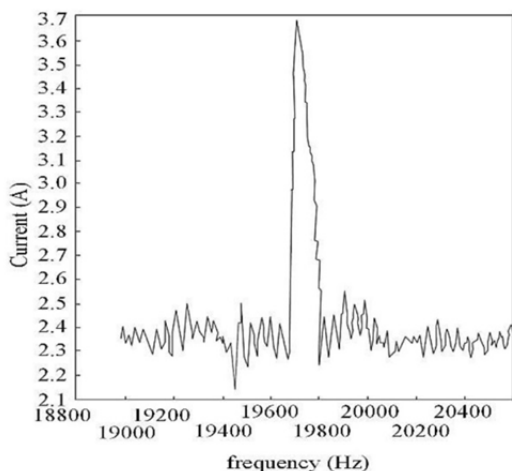


Fig. 5 Analysis of resonance frequency in assembly of ultrasonic and Tensile Test specimen

شکل 5 آنالیز فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی (نمونه تست کشش و ترانسدیوسر)

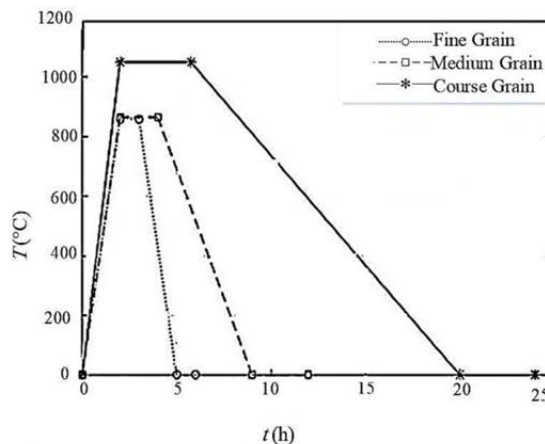


Fig.1 Heat Treatment cycle performed on S355J2

شکل 1 سیکل عملیات حرارتی انجام گرفته بر روی فولاد

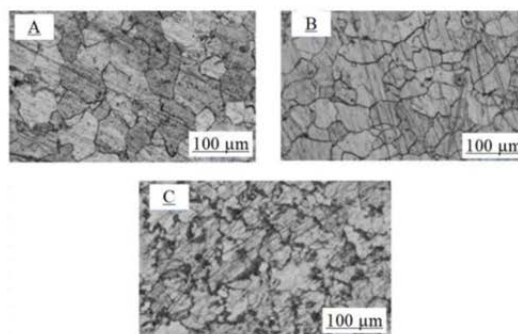


Fig. 2 Steel with different grain Size. A)60µm B) 35µm C) 10µm

شکل 2 فولاد با اندازه دانه‌های متفاوت. A) 60 میکرون B) 35 میکرون C) 10 میکرون

شده بود، بنابراین فرکانس رزونانس نمونه 20 kHz در نظر گرفته شد و آنالیز مودال به صورت شبیه‌سازی المان محدود انجام پذیرفت. به منظور تحلیل المان محدود از نرم‌افزار انسیس¹ با المان SOLID186 برای مش‌بندی استفاده گردید که نتیجه تحلیل در "شکل 3" آورده شده است. همچنین "شکل 4" نشان دهنده ابعاد نمونه فولادی جهت تست نرم‌شدگی آکوستیکی می‌باشد.

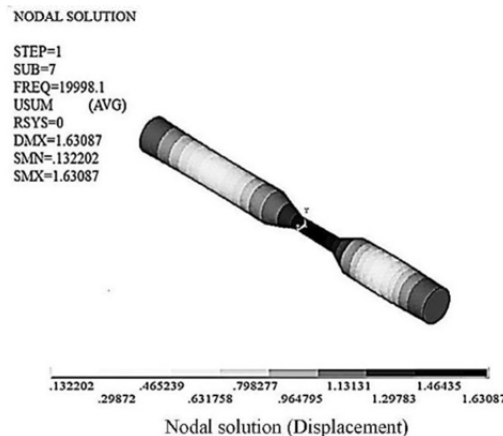


Fig. 3 Modal simulation of tension specimen designed for acoustic softening evaluation

شکل 3 شبیه‌سازی مودال نمونه تست کشش برای بررسی نرم‌شدگی آکوستیکی فولاد.

¹ ANSYS

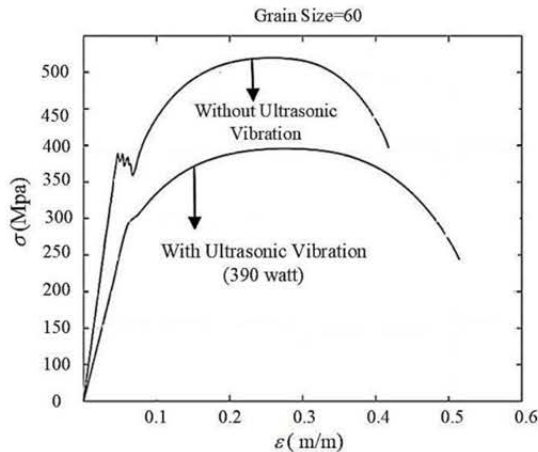


Fig. 9 Stress reduction of steel (grain size = 60 μm)

شکل 9 کاهش تنش در فولاد با اندازه دانه 60 میکرون

مرز دانه‌های مجاور (بعد از حرکت جزئی) و همچنین پخش شدن انرژی ارتعاشات کمتر در مرز دانه با طول بیشتر، مقدار نرم‌شدگی آکوستیکی کمتر خواهد بود. با توجه به نتایج به دست آمده از تست تجربی نرم‌شدگی آکوستیکی، می‌توان مقادیر کاهش تنش نهایی و همچنین کاهش تنش تسلیم نمونه‌ها با اندازه دانه‌های مختلف، قبل و بعد از اعمال ارتعاشات اولتراسونیک را به ترتیب در "شکل‌های 10 و 11" در جدول 3 نشان داد به طوری که با اعمال ارتعاشات با توان 390 وات استحکام نهایی فولاد با

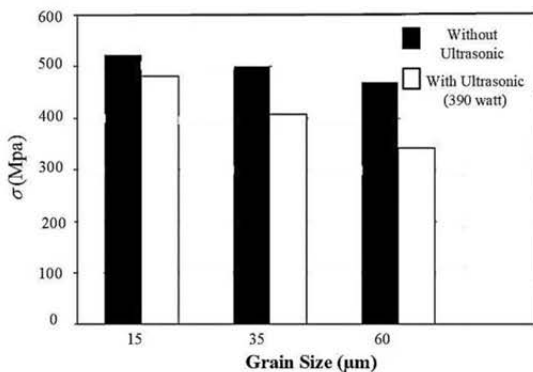


Fig. 10 The amount of ultimate strength before and after ultrasonic vibration

شکل 10 مقادیر استحکام نهایی نمونه‌ها، قبل و بعد از اعمال ارتعاشات

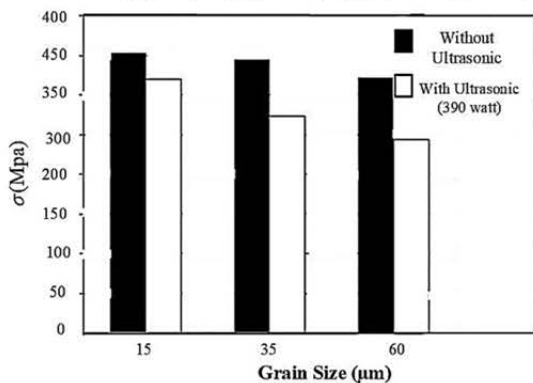


Fig. 11 The amount of Yield strength before and after ultrasonic vibration

شکل 11 مقادیر استحکام تسلیم نمونه‌ها، قبل و بعد از اعمال ارتعاشات

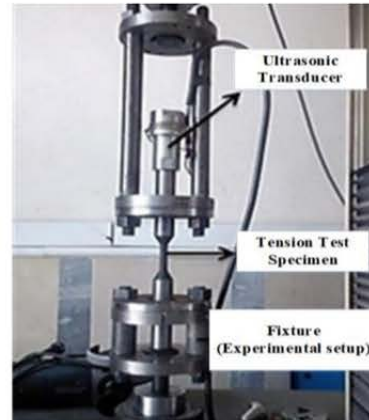


Fig. 6 Experimental setup for acoustic softening evaluation

شکل 6 مجموعه آزمایش تجربی برای ارزیابی پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی

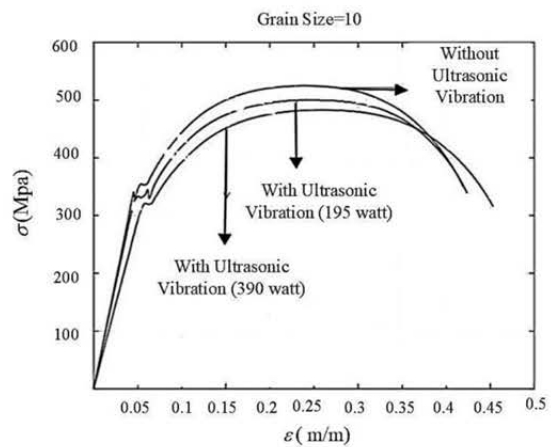


Fig. 7 Stress reduction of steel (grain size = 10 μm)

شکل 7 کاهش تنش در فولاد با اندازه دانه 10 میکرون در اثر ارتعاشات اولتراسونیک

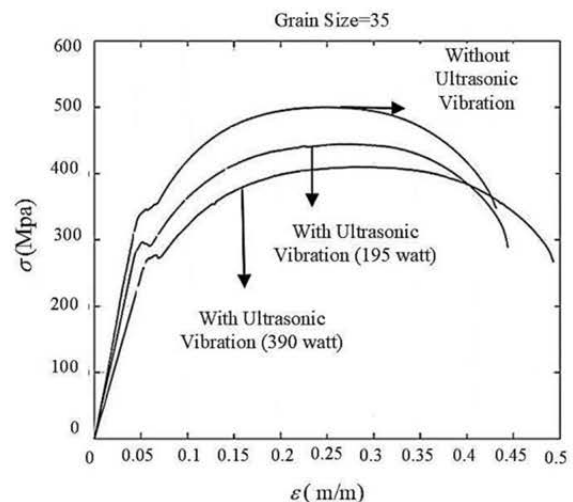


Fig. 8 Stress reduction of steel (grain size = 35 μm)

شکل 8 کاهش تنش در فولاد با اندازه دانه 35 میکرون

بیرونی را خواهد داشت و مقدار نرم‌شدگی آکوستیکی کمتری در این نمونه‌ها اتفاق می‌افتد [10]. پس مطابق این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که برخلاف تحقیق گذشته در مورد نمونه‌های فلز مس با اندازه دانه متفاوت، هرچه مقدار میزان مرز دانه‌ها بیشتر باشد به دلیل قفل‌شدگی مرز دانه‌ها توسط

جدول 3 درصد تغییرات استحکام فولاد با اندازه دانه مختلف در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک

Table 3 Strength change due to ultrasonic vibrations

تغییرات افزایش طول (e%)	درصد کاهش	استحکام تسلیم با اعمال ارتعاشات	درصد کاهش	استحکام نهایی با اعمال ارتعاشات	شرایط آزمون
3	6 %	332 MPa	4 %	500 MPa	فولاد ریزدانه، ارتعاشات 195 وات
8	9 %	320 MPa	8 %	482 MPa	فولاد ریزدانه، ارتعاشات 390 وات
5	11 %	308 MPa	12 %	440 MPa	فولاد متوسط‌دانه، ارتعاشات 195 وات
14	20 %	274 MPa	18 %	404 MPa	فولاد متوسط‌دانه، ارتعاشات 390 وات
21	24 %	244 MPa	27 %	342 MPa	فولاد درشت‌دانه، ارتعاشات 390 وات

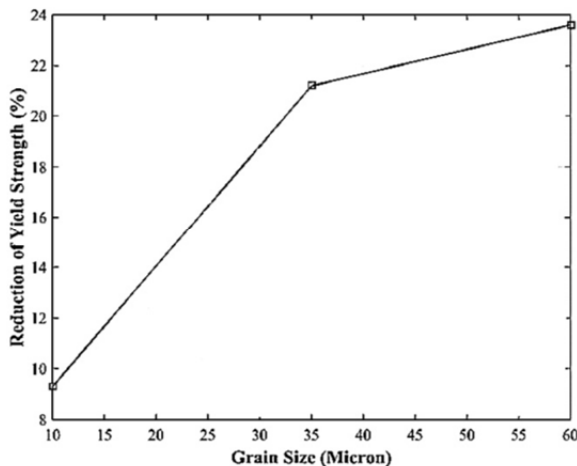


Fig. 12 The effect of grain size on yield strength reduction in S355J2

شکل 12 تاثیر اندازه دانه بر کاهش استحکام تسلیم فولاد S355J2 در اثر اعمال ارتعاشات

استحکام نهایی ماده موردنظر می‌شود و اگر شدت ارتعاشات اعمالی را افزایش یابد و مقدار انرژی بیشتری به نمونه وارد شود، کاهش استحکام کششی و نهایی نیز بیشتر می‌شود. در تحقیق حاضر به‌طور متوسط با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با توان 390 وات، برای فولادهای درشت دانه بهترین و بیشترین کاهش استحکام کششی به‌دست آمد که حدوداً 27 درصد است. با توجه به این‌که یکی از اهداف این تحقیق بررسی اثر شدت ارتعاشات اولتراسونیک بر روی نرم‌شدگی آکوستیکی بود لذا استحکام تسلیم و نهایی فولاد در دو حالت بدون اعمال و همچنین با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با توان 390 وات به میزان 9 درصد از استحکام تسلیم فولاد ریزدانه و 11 درصد از استحکام تسلیم فولاد متوسط دانه و همچنین 24 درصد از استحکام تسلیم فولاد درشت دانه کاسته می‌شود در همین فولاد با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با توان 195 وات درصد کاهش استحکام تسلیم کاهش می‌یابد. یکی از مکانیزم‌های تاثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر ساختار ماده و وقوع نرم‌شدگی آکوستیکی، جذب انرژی صوتی توسط مرز دانه‌هاست. در نمونه‌ها با اندازه دانه ریزتر بیشترین طول مرز دانه وجود دارد. به‌علت تقسیم شدن انرژی ارتعاشی کمتر در واحد طول در نمونه‌های ریزدانه، مقدار کاهش استحکام تسلیم و مقدار نرم‌شدگی آکوستیکی کمتر می‌باشد.

شایان‌ذکر است به‌دلیل این‌که برای افزایش شدت ارتعاشات اعمالی، توان اعمالی زیاد می‌شود و از آن‌جا که افزایش توان ارتعاشات همراه با افزایش دامنه ارتعاشات است، لذا می‌توان گفت اثر دامنه ارتعاشات اعمالی به‌قطعه‌کار نیز به‌مانند اثر شدت ارتعاشات اعمالی است و افزایش دامنه سبب کاهش

اندازه دانه 15 میکرون از 505 مگاپاسکال به 482 مگاپاسکال (4 درصد)، استحکام نهایی فولاد با اندازه دانه 35 میکرون از 498 مگاپاسکال به 408 مگاپاسکال (18 درصد)، استحکام نهایی فولاد با اندازه دانه 60 میکرون از 470 مگاپاسکال به 342 مگاپاسکال (27 درصد)، کاهش می‌یابد به عبارتی با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با توان ذکرشده به میزان 8 درصد از استحکام نهایی فولاد ریزدانه، 18 درصد از استحکام نهایی فولاد متوسط دانه (35 میکرون) و 27 درصد از استحکام نهایی فولاد با اندازه دانه 60 میکرون کاسته می‌شود. همچنین مطابق "شکل‌های 10 و 11" استحکام تسلیم فولاد ریزدانه در اثر اعمال ارتعاشات با توان 390 وات از 351 مگاپاسکال به 320 مگاپاسکال افت پیدا کرده و کاهش 8 درصدی دارد در حالی که با این شدت ارتعاشات، استحکام تسلیم فولاد با اندازه دانه 35 میکرون 20 درصد کاهش یافته و از 342 مگاپاسکال به 274 افت پیدا کرده است. استحکام تسلیم نمونه آزمایش شده با اندازه دانه 60 میکرون در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با توان 390 وات به میزان 22 درصد افت پیدا کرده و از 322 مگاپاسکال به 244 مگاپاسکال می‌رسد.

نتایج زیر با نتایج مشابه همخوانی دارد، در تحقیق احمدی و همکاران [7]، نتایج نشان داد که در نمونه‌های با اندازه دانه‌های 109, 35, 15, 0.97 میکرون کاهش تنش تسلیم به ترتیب برابر با 66%, 56%, 29%, 11% است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار انرژی بر واحد طول مرز دانه می‌تواند عامل مهمی در این کاهش باشد. علاوه‌براین، یکی از عوامل دیگر در توجیه این پدیده پدیده ایجاد گرمای موضعی در مرز دانه‌ها است که می‌تواند اثری همانند اثر افزایش دما را در کاهش تنش تسلیم داشته باشد و به این اثر گرمایش آکوستیکی¹ هم گفته می‌شود. همچنین از دیگر علل می‌توان به قابلیت فعال‌سازی نایبایی‌ها توسط ارتعاشات اولتراسونیک اشاره کرد [2].

همچنین می‌توان با استفاده از نتایج تجربی به دست آمده، مقدار تغییرات درصد کاهش استحکام تسلیم فولاد S355J2 (نرم‌شدگی آکوستیکی) را نسبت به اندازه دانه نشان داد که نتیجه آن در "شکل 12" آورده شده است و شایان ذکر است که شکل زیر با در دست داشتن مقادیر مربوط به سه اندازه دانه ترسیم شده است و هر چه داده‌های بیشتری موجود باشد می‌توان نمودار دقیق‌تری رسم کرد. مطابق تحقیقات انجام‌گرفته در سال‌های قبل، مقدار نرم‌شدگی آکوستیکی (کاهش استحکام تسلیم) با افزایش شدت ارتعاشات اولتراسونیک (افزایش ولتاژ ورودی به ترانس‌دیوسر)، افزایش می‌یابد اما این مقدار افزایش برای هر جنسی مقدار مختلف می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

با توجه با آزمایش‌های انجام گرفته نتیجه می‌شود که اعمال ارتعاشات اولتراسونیک به نمونه آزمون در حال کشش، سبب افت استحکام کششی و

¹ Acoustic Heating

- [5] T. Wen, L. Wei, X. Chen, C. I. Peiet, Effects of ultrasonic vibration on plastic deformation of AZ31 during the tensile process. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 18, No. 1, pp. 70-76, 2011.
- [6] M. Shalvandi, Y. Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi, Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief, *Journal of Materials & Design*, Vol. 46, pp. 713-723, 2013.
- [7] F. Ahmadi, M. Farzin, M. Mandegari, Effect of grain size on ultrasonic softening of pure aluminum, *Journal of Ultrasonics*, Vol. 63, pp. 111-117, 2015
- [8] S. M. Copley, Heat treating, E. L. Langer, ASM Handbook, Vol. 4, pp. 85-102, Ohio, ASM International 2004.
- [9] A. Standard, E8-04, Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM Handbook, 2004.
- [10] A. Siddiq, T. E. Sayed, Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM. *Journal of Materials Letters*, Vol. 65, No. 2, pp. 356-359, 2011.

بیشتر تنش تسلیم می‌شود.

5- مراجع

- [1] C. Wang, Y. Liu, B. Guo, B. Shan, et al, Acoustic softening and stress superposition in ultrasonic vibration assisted uniaxial tension of copper foil: experiments and modeling. *Journal of Materials & Design*, Vol. 112, pp. 246-253, 2016.
- [2] B. Langenecker, Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-8, 1966.
- [3] O. K. Izumi, Y. Oyama, Y. Suzuki, Effects of superimposed ultrasonic vibration on compressive deformation of metals, *Journal of the Japan Institute of Metals*, Vol. 7, No. 3, p. 158-161, 1966.
- [4] Y. Daud, M. Lucas, Z. Huang, Modelling the effects of superimposed ultrasonic vibrations on tension and compression tests of aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1, pp. 179-190, 2007.