

تأثیر میکرو ساختار فولاد CK45 بر وقوع پدیده نرم شدگی آکوستیکی

میرداود حسینی¹، مقصود شلوندی^{2*}، آیدین سلیمی اصل³

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

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

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

چکیده

امواج ارتعاشی با فرکانس بیشتر از 20kHz که تحت عنوان ارتعاشات اولتراسونیک شناخته می‌شود، در بسیاری از روش‌های تولیدی و فرآیندهای مهندسی به کار گرفته می‌شود. در این مقاله به بررسی وقوع پدیده نرم شدگی آکوستیکی در نمونه‌های فولادی با سه نوع میکرو ساختار متفاوت پرداخته شده است. برای این منظور توسط عملیات حرارتی آستمپرینگ و کوئنچ نمونه‌هایی با ریزساختارهای بینیتی و مارتنزیتی ایجاد گردید. ابعاد نهایی این نمونه‌ها جهت انجام آزمون توسط روش المان محدود آنالیز مودال در نرم‌افزار انسیس طوری به دست آورده شد که فرکانس رزونانس نمونه با فرکانس رزونانس ترانسدوسر برابر باشد. با توجه به این که در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک، تنش موسوم به تنش ارتعاشی به شبکه کریستالی وارد می‌شود، لذا تنش فوق سبب حرکت نابجایی‌ها گشته و باعث کاهش استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه می‌گردد. در این مقاله با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 55 W/cm^2 به مقدار 8, 12, 18 درصد از استحکام تسلیم نمونه‌ها با ریزساختار فرتیتی و پرلیتی، بینیتی و همچنین مارتنزیتی کاسته می‌شود. به علت جذب انرژی ارتعاشات توسط نابجایی‌ها، شکل‌دهی و فرم دهی این مواد با صرف نیروی کمتر انجام می‌گیرد. همچنین در این مقاله از مدل ریاضی ارائه شده موجود برای نرم شدگی آکوستیکی استفاده و مشخص شد که همبستگی مناسبی بین مدل‌سازی عددی ارائه شده توسط سایر محققین و نتایج آزمایش‌های تجربی در این مقاله وجود دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 29 بهمن 1396
پذیرش: 26 فروردین 1397
ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

ارتعاشات اولتراسونیک

تست کشش

نرم شدگی آکوستیکی

ریزساختار

Effect of Micro structure on Acoustic Softening of CK45 Steel

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 15 April 2018
Available Online 17 May 2018

Keywords:

Ultrasonic vibration
Tensile Test
Acoustic Softening
microstructure

ABSTRACT

Vibration waves with frequencies greater than 20 kHz, known as ultrasonic vibrations, are used in many manufacturing and engineering processes. This paper studies the occurrence of acoustic softening in steel specimens with three different microstructures. For this purpose, specimens with bainite and martensitic microstructures were created by Austempering and Quench heat treatments. The final dimensions of these specimens were obtained with Modal finite element analysis using ANSYS software so that the resonance frequency of the specimen is equal to the resonance frequency of transducer. Given that ultrasonic vibration induces a tension called vibrational stress to the crystal, this stress causes movement of dislocations and reduces the yield strength of specimens. In this paper 55 w / cm² ultrasonic vibration, 18%, 12% and 8% yield strengths of specimens are reduced with ferrite-perlite, bainite and martensitic microstructure. Due to the absorption of vibrational energy by dislocation, the metal forming of these materials takes place with less energy. Also, in this paper, a numerical model for acoustic softening was investigated and it was found that there is a good correlation between numerical modeling and experimental results.

1- مقدمه

مهمی است که توجه محققین و پژوهشگران را به خود جلب کرده است. لانگنر (1966) به بررسی اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک بر استحکام ماده پرداخته است. در این تحقیق برای مشاهده پدیده نرم شدگی آکوستیکی مواد از ارتعاشاتی با فرکانس 15 kHz تا 1MHz استفاده شده است. لانگنر در این تحقیق به بررسی دو پدیده غیرخطی در مواد پرداخت که اولی نرم‌شدگی آکوستیکی و دومی سخت‌شدگی آکوستیکی است [1]. پدیده نرم شدگی آکوستیکی در اثر اعمال ارتعاشات به نمونه‌ها ایجاد می‌شود و سخت‌شدگی آکوستیکی پس از اعمال ارتعاشات و به دلیل انجام

با توجه به افزایش استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیندهای ساخت، بررسی اثرات و تغییرات متالورژیکی و مکانیکی مواد در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از عوامل گسترش استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیندها، وقوع پدیده نرم شدگی آکوستیکی است و با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت مناسب (دامنه و فرکانس) استحکام تسلیم و نهایی مواد مختلف کاهش می‌یابد. پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی و بررسی آن در شرایط مختلف، یکی از زمینه‌های تحقیقاتی

دانه 38 میکرون و 15 میکرون، به ترتیب 29.16 و 56.19 درصد کاهش در استحکام تسلیم گزارش شد [5]. صدیق و سایید پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی را در فلزات تک کریستاله همچون آلومینیوم بررسی و شبیه‌سازی نموده‌اند و عنوان کردند که همبستگی مناسبی بین روش تجربی و روش آنالیز المان محدود در تست نرم‌شدگی آکوستیکی آلومینیوم تک کریستاله وجود دارد [6].

در این پژوهش وقوع پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی در نمونه‌های فولادی با میکروساختارهای متفاوت (فریتی-پرلیتی، بینیتی و همچنین مارتنزیتی) بررسی شده است تا تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک اعمالی بر استحکام تسلیم نمونه‌ها در تست کشش بررسی شده و نتایج آزمایش‌های تجربی با مدل عددی موجود برای پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی، مقایسه شوند.

2- انتخاب مواد و تهیه نمونه‌ها

در پژوهش حاضر از فولاد Ck45 (1.1191) برای نشان دادن تأثیر ریزساختار استفاده شد. فولاد مذکور از پرکاربردترین فولادها در صنایع مختلف از جمله صنایع کشتی‌سازی و قالب‌سازی و ماشین‌کاری است. آنالیز شیمیایی فولاد مورد آزمایش توسط تست کوانتومتری به‌دست آمد که نتیجه آن در جدول‌های 1 و 2 آورده شده است. خواص مکانیکی فولاد 1.1191 بر استاندارد ASTM در جدول 2 آورده شده است.

3- آزمایش‌های تجربی

3-1- عملیات حرارتی

بر اساس روش پیشنهادی استاندارد ASM برای دست آوردن ریزساختارهای مختلف در نمونه‌ها، عملیات حرارتی آستمپرینگ و کوئنچ انجام گردید. ابتدا نمونه‌ها به سه گروه تقسیم شدند. با توجه به این‌که گروه اول حاوی ساختار فریتی و پرلیتی است لذا بدون انجام هیچ نوع عملیات حرارتی، به‌عنوان نمونه آزمایشی در نظر گرفته شده‌اند. گروه دوم نمونه‌ها جهت ایجاد ساختار بینیت از فولاد 1.1191 مطابق نمودار تعادلی این فولاد و استاندارد ASM، در داخل کوره با نرخ 7 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند، ابتدا به دمای آستنیتی 860 درجه رسانیده شده و به مدت 1.5 ساعت در این دما نگهداری شدند و بعد از این مدت و ایجاد فاز آستنیت، نمونه‌ها بلافاصله در

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد Ck45

عنصر	C	Mn	Si	Ni
درصد	0.437	0.76	0.214	0.56
عنصر	Mo	Cr	Cu	Fe
درصد	0.05	0.46	0.021	98.347

جدول 2 خواص مکانیکی فولاد 1.1191

خواص	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	سختی (HRC)	تغییر طول (%)
فریت-پرلیتی	537	672	22	26
بینیتی	589	899	38	22
مارتنزیتی	1193	1484	52	3

زمان کمتر از 10 ثانیه به داخل کوره حمام نمک که در دمای 420 درجه سانتی‌گراد قرار داشت، انتقال داده شدند و به مدت 2 ساعت در این دما

کار سرد در مواد ظاهر می‌شود. لانگنر از شدت‌های مختلف اولتراسونیک در بازه 15 تا 50 وات بر سانتی‌متر مربع استفاده کرد و نمونه‌های استاندارد آزمون کشش با مقطع دایره تهیه گردیده بود و هم‌زمان با عمل آزمون کشش در دستگاه کشش، ارتعاشات اولتراسونیک نیز به نمونه‌ها اعمال می‌شد. نتایج این تحقیق نشان داد با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 15 وات بر سانتی‌متر مربع استحکام تسلیم و استحکام کششی آلومینیوم به مقدار 35 درصد کاهش می‌یابد و با افزایش شدت امواج اولتراسونیک به 35 وات بر سانتی‌متر مربع استحکام تسلیم 70 درصد کاهش می‌یابد [1]. تانگ ون و همکاران (2011) به بررسی تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر روی تغییر شکل پلاستیک منیزیم AZ31 در فرایند آزمون کشش پرداخته‌اند [2]. در این تحقیق فرکانس کاری 15 کیلوهرتز و توان 2 کیلووات انتخاب شده بود. با انجام آزمون کشش آلیاژ منیزیم AZ31، آشکار شد که ارتعاشات اولتراسونیک (تأثیر حجمی) بر کاهش تنش لازم جهت تغییر شکل تأثیر می‌گذارد. محققین دو تأثیر مخالف هم یعنی نرم‌شدگی و سخت‌شدگی آکوستیکی را مشاهده کردند. همچنین مشخص شد که اگر دامنه ارتعاشات یا انرژی ارتعاش اعمالی به نمونه کشش، کمتر باشد نرم‌شدگی آکوستیکی تأثیر غالب خواهد داشت و در این حالت استحکام AZ31 کاهش خواهد یافت و شکل‌پذیری آن راحت‌تر خواهد بود ولی اگر دامنه ارتعاشی بیشتر باشد، سخت‌شدگی آکوستیکی اتفاق می‌افتد و استحکام ماده افزایش می‌یابد و شکل‌پذیری آن به‌مراتب سخت‌تر می‌شود [2]. محققین اذعان داشتند به محض شروع شدن ارتعاشات اولتراسونیک، مقاومت برشی برای تمامی نمونه‌ها کاهش یافت. زمانی که انرژی ارتعاشی افزایش یافت، مقاومت در برابر تغییر شکل نمونه‌ها به‌طور کامل کاهش نیافت. همچنین با افزایش دامنه ارتعاش، پدیده سخت‌شدگی آشکارتر شد. یائو و همکاران (2012) به بررسی اثر نرم‌شدگی و سخت‌شدگی آکوستیکی در آلومینیوم پرداختند و برای بررسی نرم‌شدگی آکوستیکی از تئوری فعالیت دمایی و برای بررسی سخت‌شدگی آکوستیکی از تئوری ناپجایی‌ها استفاده کردند [3]. یائو و همکاران بیان کردند که نرم‌شدگی آکوستیکی با دامنه ارتعاشات رابطه دارد و همچنین سخت‌شدگی آکوستیکی متناسب با دامنه ارتعاش و مدت‌زمان اعمال ارتعاش است و همچنین آن‌ها مدل عددی مناسب برای وقوع پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی را بیان کردند. شلوندی و همکاران (2012) به بررسی رفتار نرم‌شدگی آکوستیکی مواد در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک پرداختند [4]. در این تحقیق اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک بر روی فولاد کربنی ساده و فولاد ضدزنگ بررسی شده است. دامنه ارتعاشات اعمالی برابر با 10 میکرون بوده و از ارتعاشات با شدت 42 و 84 وات بر سانتی‌متر مربع برای مرتعش کردن نمونه‌های آزمون کشش استفاده شده است. مقدار توان استفاده شده توسط محققین برابر با 300 و 600 وات هست. نتایج آزمایش‌ها تجربی نشان داده 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 [4]. احمدی و همکاران به بررسی تأثیر اندازه دانه در نرم‌شدگی آکوستیکی آلومینیوم خالص پرداختند. احمدی برای این آزمون، هورن مناسب طراحی کرده و قطعه آلومینیومی را با اندازه دانه‌بندی متفاوت درست کردند، برای این کار فرکانس 20kHz و اندازه دانه‌های 0.97، 7، 15، 38، 109 میکرون و همچنین مقدار دامنه ارتعاشات ورودی 5 میکرون انتخاب شد. نتایج نشان داد در نمونه‌هایی با اندازه دانه بزرگ (109 میکرون) استحکام تسلیم به مقدار حدوداً 66 درصد و در نمونه‌ها با اندازه دانه کوچک‌تر (0.97 میکرون)، استحکام تسلیم به مقدار حدوداً 11.3 درصد کاهش می‌یابد. همچنین برای نمونه‌هایی با اندازه

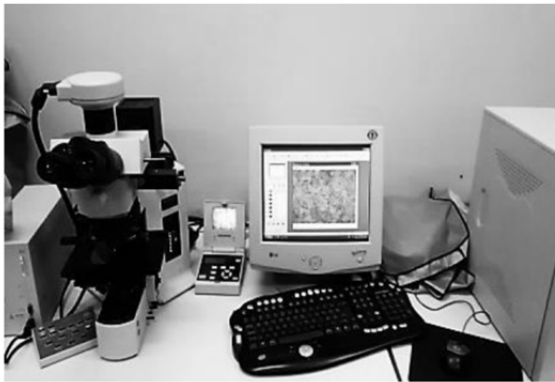


Fig. 3 Metallographic equipment for viewing of microstructures

شکل 3 تجهیزات متالوگرافی جهت مشاهده ریزساختارهای فولاد



Fig. 4 Steel (1.1191) with Microstructure of Martensite

شکل 4 فولاد (1.1191) با میکرو ساختار مارتنزیتی

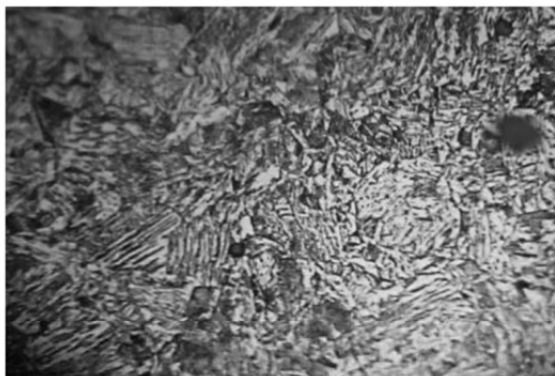


Fig. 5 Steel (1.1191) with Microstructure of Bainite

شکل 5 فولاد (1.1191) با میکرو ساختار بینیتی

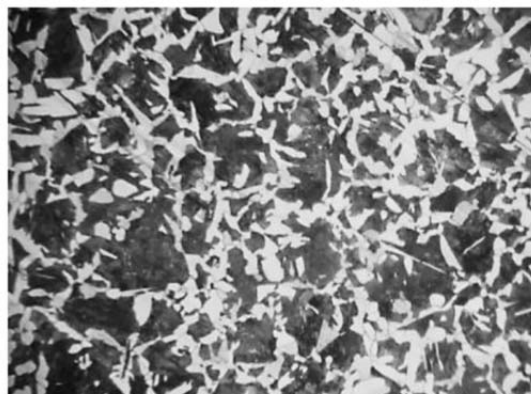


Fig. 6 Steel (1.1191) with Microstructure of Ferrite-Pearlite

شکل 6 فولاد (1.1191) با میکرو ساختار فریتی-پرلیتی

نگهداری شده سپس در هوا خنک گردیدند [7]. با انجام چنین سیکل عملیات حرارتی و متالوگرافی نمونه شاخص، مشخص گردید که نمونه دارای فاز بینیتی است. در عملیات حرارتی گروه سوم، براساس روش پیشنهادی استاندارد ASM، نمونه‌ها پس از گرم شدن در کوره با نرخ 7 درجه سانتی-گراد در هر دقیقه و نگهداری به مدت 1 ساعت در دمای 860 درجه، بلافاصله از کوره خارج گردیده و به داخل روغن نسوز انداخته سپس به آرامی در هوای آزاد خنک شدند [8]. با انجام این عملیات حرارتی کوئنچ کردن، نمونه‌هایی با ساختار مارتنزیتی به دست آورده شده است "شکل 1 و 2" نمودار تعادلی این فولاد و سیکل عملیات حرارتی انجام گرفته بر روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بعد از انجام سیکل‌های عملیات حرارتی کوئنچ و آستمپرینگ، متالوگرافی نمونه‌ها جهت حصول اطمینان از ایجاد میکروساختارهای مدنظر انجام گردید. "شکل 3" نشان‌دهنده تجهیزات متالوگرافی و نحوه مشاهده ریزساختار بوده و "شکل‌های 4 تا 6" تصاویر متالوگرافی نمونه‌های شاخص را نشان می‌دهند [9].

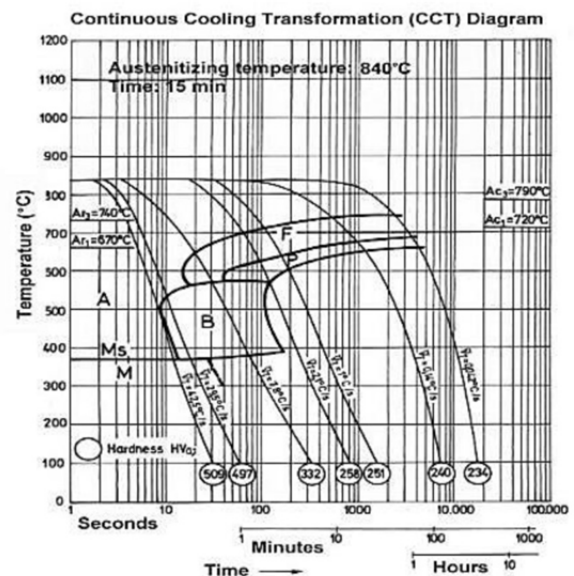


Fig. 1 Time-Temperature Transformation Diagram of 1.1191[7]

شکل 1 نمودار TTT فولاد 1.1191

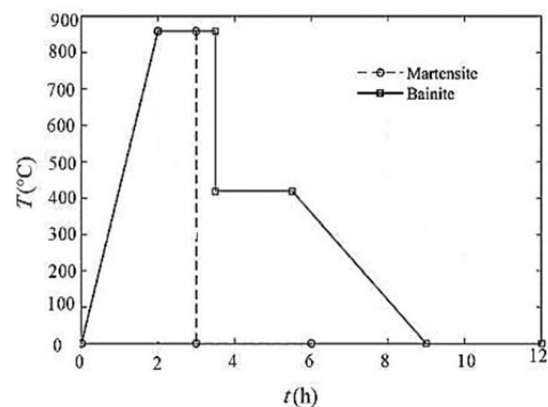


Fig. 2 Heat Treatment cycle performed on 1.1191

شکل 2 سیکل عملیات حرارتی انجام گرفته بر روی فولاد 1.1191

2-3- تحلیل و طراحی نمونه آزمون کشش

در این پژوهش از ترانسدیوسر با توان 1 کیلووات و فرکانس رزونانس 20kHz 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 گونه ای 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 شده بود، بنابراین فرکانس رزونانس نمونه را 20kHz در نظر گرفته و آنالیز مودال به صورت شبیه سازی المان محدود انجام شد و جهت تحلیل المان محدود از نرم افزار انسیس با المان سه بعدی 186 برای مش بندی استفاده گردید که نتیجه تحلیل در "شکل 7" آورده شده است. همچنین "شکل 8" نشان دهنده ابعاد نمونه فولادی جهت تست نرم شدگی آکوستیکی است که قطر قسمت های مختلف طبق دستورالعمل استاندارد ASTM تعیین شده است و طول های مجاز به تغییر، با استفاده از شبیه سازی اجزا محدود به گونه ای تعیین شد تا در نمونه تشدید اتفاق افتد.

با توجه به این که با تغییر سطح مقطع، دامنه ارتعاشات نیز تغییر می کند بنابراین دامنه ارتعاشات در وسط نمونه 6.25 برابر دامنه ارتعاشات در ابتدا و انتهای نمونه است. "شکل 9" نشان دهنده تغییرات دامنه ارتعاشات در طول نمونه در مقاطع مختلف است.

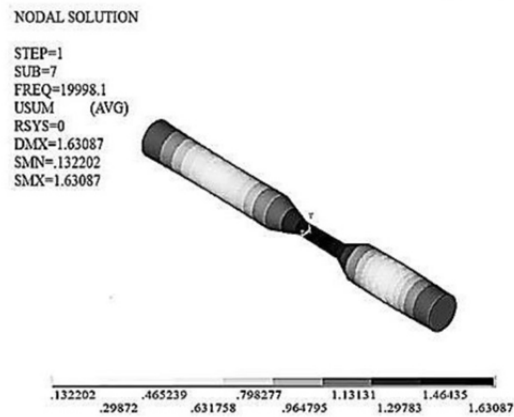


Fig. 7 Modal simulation of tension specimen designed for acoustic softening evaluation

شکل 7 شبیه سازی مودال نمونه تست کشش برای بررسی نرم شدگی آکوستیکی فولاد

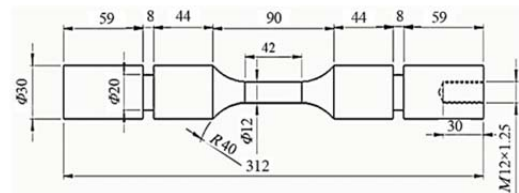


Fig. 8 The Final dimension of Tension specimen
شکل 8 ابعاد نهایی نمونه تست کشش [10]

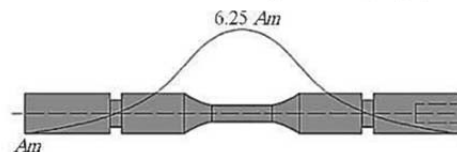


Fig. 9 Vibrations Amplitude at different sections
شکل 9 دامنه ارتعاشات در مقاطع مختلف

4- انجام تست کشش

با توجه به نتیجه به دست آمده در تحلیل المان محدود که در "شکل 7" آورده شده است و همچنین الزامات طراحی آزمون کشش براساس استاندارد ASTM، نمونه آزمون به صورت "شکل 8" طراحی و ساخته شد که دامنه ارتعاشات طبق "شکل 9" در وسط نمونه دارای دامنه حداکثری است. برای ایجاد و انتقال ارتعاشات از ترانسدیوسر با منبع تغذیه 1000 واتی استفاده گردیده است. در تست های انجام گرفته به منظور بررسی پدیده نرم شدگی آکوستیکی، ارتعاشات اولتراسونیک در تمام مدت کشش به نمونه اعمال گردید. ارتعاشات با شدت 55 وات بر سانی متر مربع به نمونه ها اعمال گردید برای بررسی پدیده نرم شدگی آکوستیکی در تست کشش، فیکسچر مناسبی جهت گرفتن نمونه ها از محل گره ها و قرارگیری مناسب ترانسدیوسر و انتقال ارتعاشات باراندمان 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 19760 هرتز به دست آمد که در "شکل 10" آورده شده است و همچنین "شکل 11" مجموعه آزمایشی تهیه را نمایش می دهد.

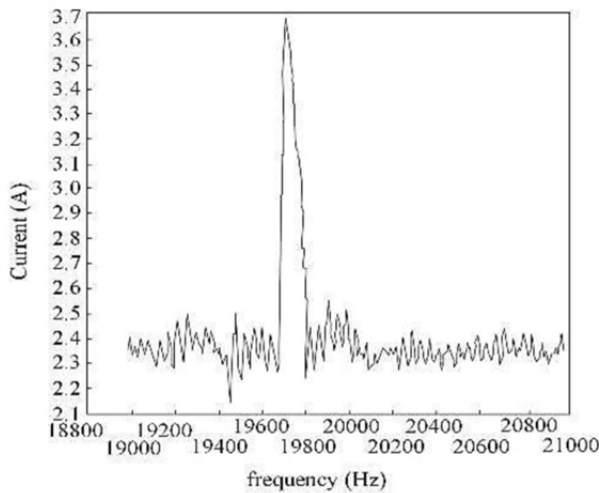


Fig. 10 Analysis of resonance frequency in assembly of ultrasonic and Tensile Test specimen

شکل 10 آنالیز فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی (نمونه تست کشش و ترانسدیوسر)

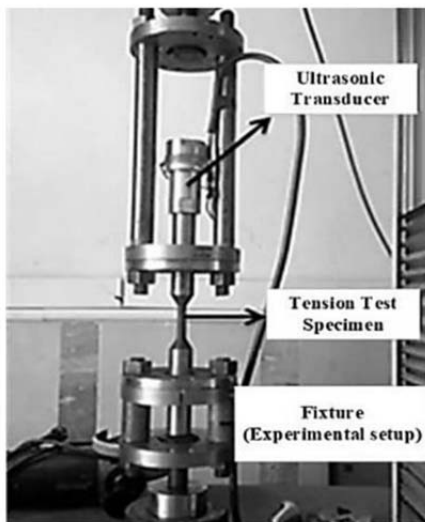


Fig. 11 Experimental setup for acoustic softening evaluation

شکل 11 مجموعه آزمایش تجربی برای ارزیابی پدیده نرم شدگی آکوستیکی

5- نتایج و بحث

5-1- نتایج آزمایشات تجربی

نمونه‌ها با ساختارهای مختلف به صورت جداگانه مورد آزمایش قرار گرفتند و نمودارهای تنش و کرنش در حالت بدون اعمال ارتعاشات اولتراسونیک و همچنین در حالت اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت‌های 55 و 28 وات بر سانتی متر مربع به دست آورده شده است.

"شکل 12" نشان‌دهنده مقایسه نمودار تنش و کرنش نمونه فولاد 1.1191 با میکروساختار پرلیتی و فریتی در دو شدت ارتعاشی 55 و 28 وات بر سانتی متر مربع نسبت به حالت بدون اعمال ارتعاشات است.

همان‌طور که از شکل مشخص است با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 28 وات بر سانتی متر مربع استحکام تسلیم فولاد با میکرو ساختار فریتی و پرلیتی به مقدار 10 درصد کاهش می‌یابد همچنین با افزایش شدت ارتعاشات از 28 به 55 وات بر سانتی متر مربع این کاهش استحکام تسلیم به 18 درصد می‌رسد. برای مقایسه می‌توان به نتایج تحقیق انجام شده توسط لانگنر اشاره کرد که با افزایش شدت ارتعاشات اعمالی از 15 به 35 وات بر سانتی متر مربع در آلومینیوم کاهش استحکام تسلیم از 35 درصد به 70 درصد افزایش می‌یابد بنابراین می‌توان مشاهده کرد که افزایش شدت ارتعاشات اعمالی در فولاد نیز مشابه با آلومینیوم، سبب کاهش بیشتر استحکام تسلیم می‌شود اما این کاهش نسبت به آلومینیوم کمتر است.

"شکل 13" نمودار تنش و کرنش فولاد با ساختار بینیتی در دو حالت اعمال ارتعاشات و بدون اعمال ارتعاشات اولتراسونیک را نشان می‌دهد.

با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 55 وات بر سانتی متر مربع استحکام تسلیم نمونه فولادی با ساختار بینیتی به مقدار 12 درصد کاهش می‌یابد. نتیجه به دست آمده در این نمودار را می‌توان با فولاد ضدزنگ بررسی شده در تحقیق شلوندی و همکاران مقایسه کرد که با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 42 وات بر سانتی متر مربع، به مقدار 32 درصد از تنش تسلیم کاسته شد با مقایسه دیده می‌شود که دلیل کاهش بیشتر در فولاد ضدزنگ در تحقیق مزبور می‌تواند به دلیل بالا بودن مقدار تنش تسلیم این فولاد باشد و می‌توان نتیجه گرفت که فولادهایی که مقدار تنش تسلیم بالایی دارند، با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک افت بیشتری دیده می‌شود و در فرآیندهایی که به منظور تسهیل عملیات ماشین کاری از ارتعاشات اولتراسونیک استفاده می‌شود، فولادهایی که استحکام تسلیم بیشتری دارند نرم‌شدگی آکوستیکی بیشتری پیدا می‌کنند و عملیات ماشین کاری آن‌ها راحت‌تر انجام می‌گیرد.

"شکل 14" نشان‌دهنده نمودار تنش و کرنش فولاد با میکروساختار مارتنزیتی در دو حالت اعمال ارتعاشات و بدون اعمال ارتعاشات است.

با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 55 وات بر سانتی متر مربع استحکام تسلیم نمونه فولادی با ساختار مارتنزیتی به مقدار 8 درصد کاهش می‌یابد. نتیجه به دست آمده در این نمودار نشان می‌دهد که با اعمال ارتعاشاتی با شدت مشابه فولاد با ساختار بینیتی به مقدار 4 درصد بیشتر از فولاد با ساختار مارتنزیتی، از خود کاهش استحکام تسلیم نشان می‌دهد همچنین فولاد با ساختار فریت-پرلیتی، به مقدار 10 درصد بیشتر از فولاد مارتنزیتی افت استحکام تسلیم نشان داده است که به نظر می‌رسد این مسئله مربوط به نوع ریزساختار باشد زیرا ریزساختارهای مارتنزیتی در مقابل تغییر شکل‌های پلاستیکی مقاومتی بیشتر از ریزساختارهای فریت-پرلیتی دارند و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مربوط به ریزساختار بینیتی بیانگر آن است که این ریزساختار مقاومتی بیشتر از ساختار فریت-پرلیتی و مقاومتی کمتر از ریزساختار مارتنزیتی در برابر تغییر شکل دارد زیرا در پدید نرم‌شدگی آکوستیکی افزایش دمای موضعی منجر به تغییر شکل‌های پلاستیکی موضعی می‌گردد و ساختارهایی که مقاومت بیشتری نشان دادند، افت کمتری داشته‌اند.

در ادامه این تحقیق، آزمایش سختی‌سنجی نمونه‌های فولادی انجام گرفت و مشخص گردید که نمونه‌ها با میکروساختار فریتی و پرلیتی دارای سختی 22 HRC و نمونه‌ها با میکروساختار بینیتی 38 HRC و همچنین نمونه‌ها با میکروساختار 52 HRC می‌باشند. لذا می‌توان رابطه بین عدد

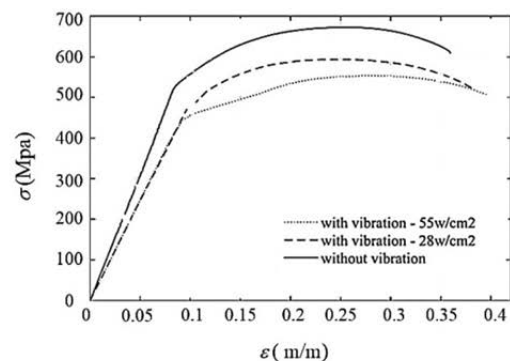


Fig. 12 Stress reduction of 1.1191 with Ferrite-Perlite microstructure
شکل 12 کاهش تنش در فولاد 1.1191 با میکرو ساختار فریتی و پرلیتی در اثر ارتعاشات اولتراسونیک

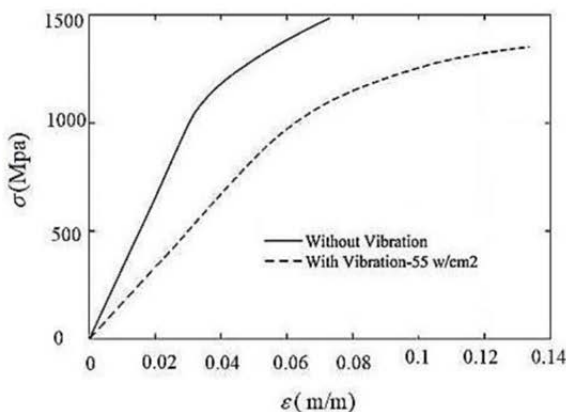


Fig. 14 stress reduction of 1.1191 with Martensite microstructure
شکل 14 کاهش تنش در فولاد 1.1191 با میکرو ساختار مارتنزیتی در اثر ارتعاشات اولتراسونیک

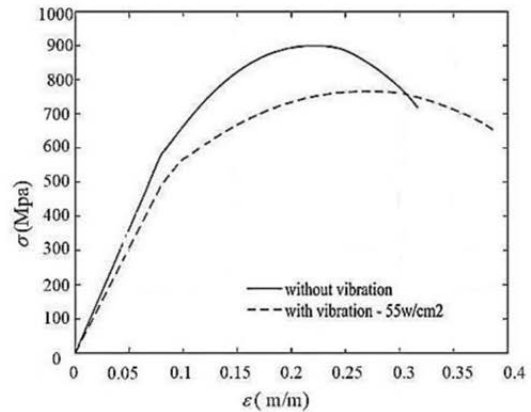


Fig. 13 stress reduction of 1.1191 with Bainite microstructure
شکل 13 کاهش تنش در فولاد 1.1191 با میکروساختار بینیتی در اثر ارتعاشات اولتراسونیک

ضریب بولتزمن $K = 1.3807 \times 10^{-23}$ و $\gamma_0^0/\gamma_p^0 = 10^7$ (مطابق ضرایب مدل عددی ارائه شده توسط محققین) برابر 196.72 GPa به دست می‌آید.

با استفاده از رابطه (5) مقدار $\Delta\lambda$ محاسبه می‌گردد.

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\sigma}{M\tau} = \frac{54}{3.06 \times 196.72 \times 10^9} = 0.09 \quad (5)$$

مقدار E (دانسیته انرژی صوتی منتقل شده) از رابطه (6) محاسبه می‌شود با توجه به این‌که دامنه ارتعاشی در این آزمایش 4 میکرون و 8 میکرون است لذا مقدار این انرژی به صورت رابطه (6) خواهد بود.

$$E = (\text{دامنه})^2 \times (\text{فرکانس زاویه ای}) \times (\text{چگالی فلز}) \quad (6)$$

$$E = 7850 * (2\pi \times 19.76)^2 \times (8 \times 10^{-6})^2 \quad (7)$$

در نهایت مقادیر به دست آورده شده در عبارت $(E/\tau)^{0.5}$ جاگذاری می‌شوند و به صورت رابطه (8) نوشته می‌شود

$$\left(\frac{E}{\tau}\right)^{0.5} = \left(\frac{7.74 \times 10^{10}}{196.72 \times 10^9}\right)^{0.5} = 0.6274 \text{ J/m}^3 \quad (8)$$

پارامتر β همان شیب نمودار $(E/\tau)^m$ برحسب $\Delta\lambda$ بوده، همچنین مقدار ثابت m برابر 0.5 و فاکتور تیلور (M) نیز 3.06 در نظر گرفته شده است. "شکل 16" نشان‌دهنده نمودار $(E/\tau)^{0.5}$ برحسب $\Delta\lambda$ برای فولاد 1.1191 است که مطابق آزمایش‌های تجربی تست کشش برای فولاد با ساختار فریتی و پرلیتی است. با استفاده از نمودار "شکل 16" و جدول 3 که نشان‌دهنده مقادیر پارامترهای مجهول مدل عددی می‌باشند می‌توان مدل عددی نرم‌شدگی آکوستیکی برای فولاد 1.1191 با ریزساختار فریتی و پرلیتی را به صورت معادله رابطه (9) بیان کرد.

$$\sigma_{\text{acoustic}} = -0.24M\tau \left(\frac{E}{\tau}\right)^{0.5} \quad (9)$$

طبق جدول 3 مقدار کاهش استحکام تسلیم فولاد در آزمایش‌های تجربی با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 28 و 55 وات بر سانتی مترمربع به ترتیب 54 و 98 مگاپاسکال می‌باشد که این کاهش استحکام تسلیم در مدل‌سازی عددی به ترتیب 46 و 90 مگاپاسکال است.

جدول 3 نتایج محاسبات دانسیته انرژی صوتی و نرخ تنش.

Table 3 Calculation results of acoustic energy density and stress ratio

شدت	ΔS_{yt}	$\Delta\lambda$	B (nm)	τ (Gpa)	$\left(\frac{E}{\tau}\right)^{0.5}$	$\Delta\sigma$
28	54	0.09	0.252	196.72	0.3142	46
55	98	0.163	0.252	196.72	0.6274	90

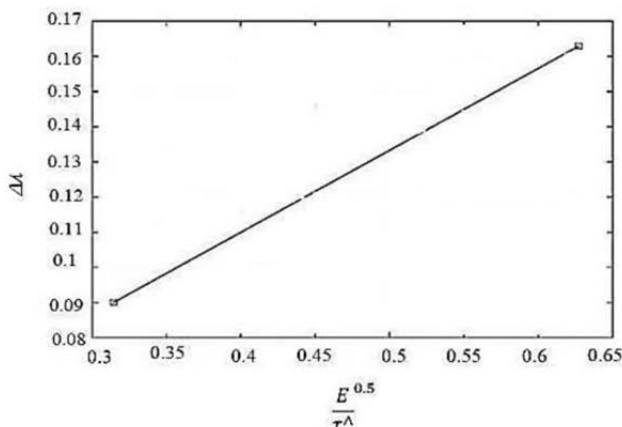


Fig. 16 Dependence of stress ratio on acoustic softening density of 1.1191 (ferrite-perlite)

شکل 16 نمودار نرخ تنش و دانسیته انرژی صوتی فولاد با ساختار فریتی و پرلیتی

سختی فولاد و کاهش استحکام تسلیم در این پژوهش را به صورت "شکل 15" ترسیم نمود.

2-5- مدل‌سازی عددی

در این بخش مدل‌سازی ارائه شده توسط محقق برای نرم‌شدگی آکوستیکی آورده می‌شود مدل موجود بر پایه تغییرات دمایی و تغییر شکل پلاستیک کریستال فلز توسط محققین ارائه شده است [3].

برای استفاده از این مدل عددی ضروری است، از نتایج تجربی تست کشش برای محاسبه پارامترهای مدل عددی پرداخته شود. مدل ارائه شده توسط یانو، کاهش تنش تسلیم ($\Delta\lambda$) برحسب دانسیته انرژی صوتی (E) و نرخ تنش را نشان می‌دهد.

$$\Delta\lambda = -\beta \left(\frac{E}{\tau}\right)^m \quad (1)$$

در این معادله β و m ضرایبی هستند که از آزمایش‌های تجربی به دست می‌آیند. λ نرخ تنش هست که از عبارت τ/τ محاسبه می‌شود. τ آستانه مکانیکی مواد است که از رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$\tau = \tau_0 \left[1 - KT \ln\left(\frac{\gamma_0^0}{\gamma_p^0}\right) / \Delta F\right] \quad (2)$$

در این رابطه، K ضریب بولتزمن، T درجه دمای کلونین، γ_0^0 فاکتور پیش تشریحی ارائه شده در مدل است که مقدار آن 10^6 است. همچنین γ_p^0 نرخ کرنش پلاستیکی است که مقدار آن 0.1 است. ΔF انرژی اکتیواسیون هست که از رابطه (3) محاسبه می‌گردد.

$$\Delta F = 0.5Gb^3 \quad (3)$$

در این رابطه، G مدول برشی فولاد (78 گیگاپاسکال) و b طول بردار برگرز می‌باشد. با توجه به مدل موجود، می‌توان مقدار نرم شدگی آکوستیکی را از رابطه (4) به دست آورد.

$$\sigma_{\text{acoustic}} = -\beta M\tau \left(\frac{E}{\tau}\right)^m \quad (4)$$

ΔS_{yt} کاهش استحکام تسلیم فولاد در تست تجربی و در اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک است. با توجه به رابطه $M = S_{yt}/\tau$ با در دست داشتن استحکام تسلیم و فاکتور تیلور، مقدار تنش برشی 196.72 GPa به دست می‌آید. مقدار انرژی اکتیواسیون از رابطه (3) و با در دست داشتن $G = 78 \times 10^9$ و طول بردار برگرز برای فولاد $b = 0.225 \times 10^{-9}$ برابر 0.6241×10^{-18} ژول به دست می‌آید. مقدار آستانه مکانیکی τ نیز از رابطه (2) و با در دست داشتن

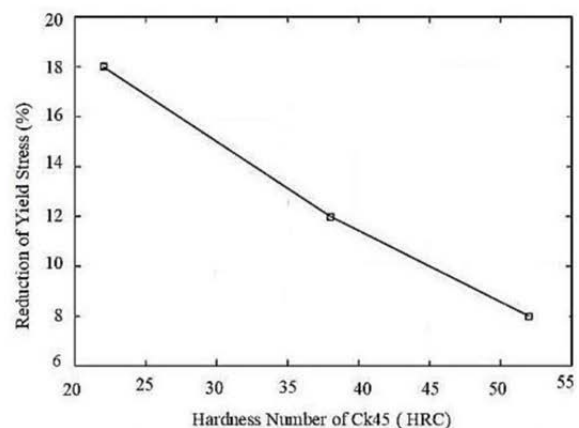


Fig. 15 Dependence of acoustic softening and hardness number of 1.1191

شکل 15 وابستگی کاهش استحکام تسلیم (نرم شدگی آکوستیکی) و عدد سختی فولاد

یکی از مکانیسم‌های تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر ساختار ماده و وقوع نرم‌شدگی آکوستیکی، حرکت نابجایی‌ها است. در نمونه‌ها با ساختار مارتنزیتی بیشترین مقدار نابجایی‌ها وجود دارد ولی کمترین مقدار وقوع پدیده نرم‌شدگی آکوستیکی اتفاق افتاد علت این اتفاق هم این است که با بیشتر شدن مقدار نابجایی‌ها، هر نابجایی توسط نابجایی‌های مجاور خود قفل می‌شود و اجازه حرکت گرفته می‌شود و همچنین انرژی ارتعاشاتی در واحد طول، کاهش می‌یابد. در نهایت تأثیر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک و وقوع نرم‌شدگی آکوستیکی کاهش می‌یابد.

استحکام نهایی نمونه‌های فولادی با ساختار فریتی-پرلیتی، بینیتی و مارتنزیتی هم بی‌تأثیر از اعمال ارتعاشات اولتراسونیک نبوده و با اعمال ارتعاشات با شدت 55 W/cm^2 ، به ترتیب 9، 15، 18 درصد کاهش در استحکام نهایی فولاد مشاهده گردید.

7- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها

نویسندگان از همکاری شرکت آذرماتل تبریز و شرکت فناوریان حدید گستر تبریز و همچنین آزمایشگاه تحلیل صنعت سپند تبریز تقدیر و تشکر می‌نمایند.

8- مراجع

- [1] B. Langenecker, effects of ultrasound on deformation characteristics of metals. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-8, 1966.
- [2] 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.
- [3] Z. Yao, G. Y. Kim, Z. Wang, Z. Chen, Acoustic softening and residual hardening in aluminum: Modeling and experiments, *International Journal of Plasticity*, Vol. 39, pp. 75-87, 2012.
- [4] M. Shalvandi, Y. Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi, Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief, *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 713-723, 2013.
- [5] F. Ahmadi, M. Farzin, M. Mandegari, Effect of grain size on ultrasonic softening of pure aluminum, *Ultrasonics*, Vol. 63, pp. 111-117, 2015.
- [6] A. Siddiq, T. E. Sayed, Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM, *Materials Letters*, Vol. 65, No. 2, pp. 356-359, 2011.
- [7] S. M. Copley, *Heat treating*, E. L. Langer, *ASM Handbook*, Vol. 4, pp 367-412, 2004.
- [8] S. M. Copley, *Heat treating*, E. L. Langer, *ASM Handbook*, Vol. 4, pp 160-211, 2004.
- [9] S. M. Copley, *Metallography and Microstructures*, E. L. Langer, *ASM Handbook*, Vol. 9, pp. 617-621, 2004.
- [10] A. Standard, E8-04, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, *ASTM Handbook*, 2004.

شایان ذکر است به دلیل این‌که برای افزایش شدت ارتعاشات اعمالی، توان عملی زیاد می‌شود و از آنجا که افزایش توان ارتعاشات همراه با افزایش دامنه ارتعاشات است، لذا می‌توان گفت اثر دامنه ارتعاشات نیز بهمانند اثر شدت ارتعاشات اعمالی 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 به‌دست‌آمده نشان داد که با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 55 W/cm^2 به میزان 18 درصد از استحکام تسلیم فولاد فریت و پرلیتی کاسته می‌شود در همین فولاد با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 8 W/cm^2 استحکام تسلیم 10 درصد کاهش می‌یابد. همچنین در همان شدت‌های ارتعاشی 18 و 12 درصد از استحکام نهایی فولاد مذکور کاسته می‌شود. در فولاد با ساختار مارتنزیتی با اعمال ارتعاشات با شدت

6- نتیجه‌گیری

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 به‌دست‌آمده نشان داد که با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 55 W/cm^2 به میزان 18 درصد از استحکام تسلیم فولاد فریت و پرلیتی کاسته می‌شود در همین فولاد با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک با شدت 8 W/cm^2 استحکام تسلیم 10 درصد کاهش می‌یابد. همچنین در همان شدت‌های ارتعاشی 18 و 12 درصد از استحکام نهایی فولاد مذکور کاسته می‌شود. در فولاد با ساختار مارتنزیتی با اعمال ارتعاشات با شدت