

ارزیابی قابلیت روش آلتراسونیک با استفاده از موج طولی موازی سطح با زاویه شکست بحرانی در حذف تنش پسماند و افزایش عمر خستگی

پژمان تقی پور بیرگانی

گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

Evaluating the capability of ultrasonic method using longitudinal wave parallel to surface with critical refraction angle in removing residual stress and increasing fatigue life

Pezhman Taghipour Birgani
Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

The measurement and removal of residual stresses using the ultrasonic method is being developed. In this paper, the capability of ultrasonic method using longitudinal wave with critical refraction angle or LCR wave in measuring and removing residual stress caused by welding has been investigated. Two plates of 2024-T351 alloy are welded together. To measure their residual stress field, the acoustoelastic property is used, and the changes in the speed of propagation of ultrasonic elastic waves when passing through the residual stress field are investigated. Then, the relationships of the effective stress intensity factor and the fatigue crack growth rate in the case where the welded parts have residual stress and are subjected to cyclic loading have been obtained. Finally, in order to eliminate tensile residual stress, a package of ultrasonic waves has been used again, and the modified relationships of stress intensity factor and fatigue crack growth rate have been introduced in this regard.

Keywords: Longitudinal Ultrasonic Wave, Residual Stresse, Stress Intensity Factor, The Fatigue Crack Growth Rate

Received: 27/04/2023

Accepted: 08/06/2023

چکیده

اندازه‌گیری و حذف تنش‌های پسماند با استفاده از روش آلتراسونیک در حال توسعه است. در این مقاله، قابلیت روش آلتراسونیک با استفاده از موج طولی با زاویه شکست بحرانی یا موج LCR در اندازه‌گیری و حذف تنش پسماند ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است. دو ورق از جنس آلیاژ 2024-T351 به یکدیگر جوش داده شده‌اند. برای اندازه‌گیری میدان تنش پسماند آن‌ها از خاصیت آکوستوالاستیک استفاده می‌شود و تغییرات سرعت انتشار امواج کشسان فراسوت هنگام عبور از میدان تنش‌های پسماند بررسی می‌شوند. سپس روابط ضریب شدت تنش موثر و نرخ رشد ترک خستگی را در حالتی که قطعات به هم جوش داده شده دارای تنش پسماند می‌باشند و تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفته‌اند، بدست آورده شده‌اند. در نهایت جهت حذف تنش پسماند کششی مجدداً از مجموعه‌ای از امواج آلتراسونیک بهره گرفته شده است و روابط اصلاح شده ضریب شدت تنش و نرخ رشد ترک خستگی در این راستا معرفی شده است.

واژه‌های کلیدی: موج آلتراسونیک طولی، تنش پسماند، ضریب شدت تنش، نرخ رشد ترک خستگی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸

نویسنده مسئول: پژمان تقی پور بیرگانی

نشانی: اهواز، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیکی: p_taghipour@iauhvaz.ac.ir

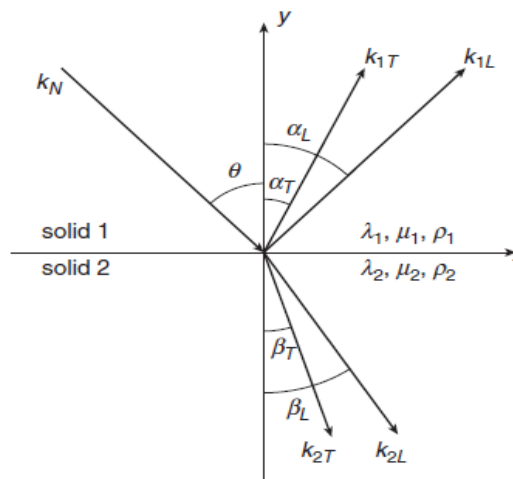
۱. مقدمه

تنش‌های پسماند در قطعات، حین عملیات تولیدی خاصی از قبیل جوشکاری، ساچمه‌زنی، ریخته‌گری و یا نورد، پدید می‌آیند. این تنش‌ها در حالت خود تعادلی قرار داشته و در حالتی که قطعات تحت اثر هیچ نیروی خارجی قرار ندارند، سبب ایجاد میدان‌های تنش تک محوری و یا چند محوری در جهت‌های طولی، عرضی و ضخامتی می‌شود. از معایب وجود تنش‌های پسماند (به ویژه 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 می‌دهد. تنش‌های پسماند اثر مخرب خود را هنگام بارگذاری نیز نشان می‌دهد 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 قبلی تسلیم، خستگی و شکست را در قطعات سرعت می‌بخشند. مورگان [۱]، تحقیقات اولیه مربوط به آلتراسونیک و تنش را شروع کردند. ایشان رابطه موج آلتراسونیک در یک محیط تحت تنش را بر حسب ضرایب درجه سوم در تابع انرژی بیان کرد. آغاز توسعه استفاده از روش آلتراسونیک برای اندازه‌گیری تنش، توسط هوگس و کلی [۲]، در سال ۱۹۵۳ و بر پایه نتایج و تئوری الاستیسیته غیرخطی مورگان بود. ایشان تغییرات سرعت موج آلتراسونیک را بعنوان تابعی از کرنش‌های الاستیک ماده ایزوتروپیک، بیان کرده و با این کار تئوری آکوستوالاستیسیته را پایه گذاری کردند. تحقیقات زیادی بر روی کارایی و راندمان تنش‌گیری در فرکانس‌های پایین انجام شده است. مک گلودریک [۳]، برای اولین بار با هدف کاهش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، ارتعاشی با فرکانس پایین تر 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 صرف نظر بوده و ترک یا شکستگی در نتیجه اعمال ارتعاشات به وجود

نیامده است. در این تحقیق، مقایسه بین حالت قبل و بعد از اعمال ارتعاشات صورت نگرفت. تحقیقات وزنی و کراومر [۴]، بیشترین تاثیر را در شناخت 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 [۵]، از ارتعاشات با فرکانس رزونانسی برای تنش‌گیری حلقه‌های آلومینیومی ریخته‌گری شده استفاده کرد و در این تحقیق حداکثر به مقدار ۷۰ درصد از مقدار تنش‌های پسماند قطعات کم شد. داوسن و مفات [۶]، برای بررسی بیشتر اثر ارتعاشات با فرکانس پایین تر بر روی مواد مختلف، از فرکانس‌های رزونانس ۳۳ و ۶۶ و ۹۲ هرتز استفاده کرده و مشاهده کردند که با تغییر فرکانس، تفاوت معنی داری در کاهش تنش‌های پسماند دیده نمی‌شود. در این تحقیق با افزایش دامنه کرنش تناوبی، مقدار تنش‌های پسماند نیز به صورت خطی کاهش یافت. والکر و همکاران [۷]، توانستند تنش‌های پسماند کششی را با روش نورد در فولاد کم‌آلیاژی ایجاد کرده و با اعمال ارتعاشات با فرکانس ۱۰۰ هرتز به مقدار ۴۰ درصد از تنش-های پسماند اولیه را کاهش دهند. همچنین لو [۸]، 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 والکر و همکاران [۹]، 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 نتیجه حاصل نشان داد که در اثر تنش‌گیری ارتعاشی حداکثر به مقدار ۳۰ درصد کاهش داشته است. وانگ [۱۰]، تحقیق مشابهی را بر روی تنش‌گیری فولادهای HSLA انجام داد و به کاهش ۲۰ 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 موج اولتراسونیک برای تنش‌گیری توسط آوکی [۱۱]، ارائه

این خاصیت، سرعت انتشار موج الکتریکی در ماده به تنش موجود در آن بستگی دارد.

اصول ایجاد موج LCR این گونه است که وقتی موج طولی به مرز مشترک دو ماده با مقاومت آکوستیکی متفاوت (یعنی سرعت انتشار موج طولی در این دو ماده متفاوت است) برخورد می‌کند، قسمتی از آن منعکس شده، باز می‌گردد که این فرایند را انعکاس گویند و قسمتی از آن با زوایای معینی وارد ماده می‌شود که به این فرایند انکسار می‌گویند. قسمت منکسر شده به دو دسته موج طولی و عرضی تقسیم می‌شود که هر کدام با زاویه متفاوتی در قطعه انتشار می‌یابند (شکل ۱).



شکل ۱- نتیجه برخورد موج طولی از یک محیط به محیط دیگر

همان‌طور که در شکل ۲ مشهود است بخشی از موج برابر با همان زاویه تابش θ به محیط ۱ منعکس می‌شود. زوایای انکسار دو موج طولی و عرضی به ترتیب با θ_L و θ_T نشان داده شده است. مابقی موج وارد محیط ۲ می‌شود و دو نوع موج آلتراسونیک طولی با زاویه β_L و عرضی یا برشی با زاویه β_T تولید می‌کند. ارتباط بین این زوایا توسط معادله اسنل، یعنی معادله (۱) مربوط است؛ که در این فرمول C سرعت موج طولی برخوردی در محیط ۱، C_L سرعت موج طولی در محیط ۲ و C_T سرعت موج عرضی در محیط ۲ است.

$$\frac{\sin \theta}{C} = \frac{\sin \beta_L}{C_L} = \frac{\sin \beta_T}{C_T} \quad (1)$$

شد. این تحقیق، با هدف اثبات کارایی ارتعاشات با فرکانس بالا، برای کاهش تنش‌های پسماند، در مرحله ی شکل‌گیری (در حین فرایند جوشکاری) انجام شد و از فرکانس رزونانس ۱۷/۸ هرتز استفاده شد. لیگون [۱۲]، از ارتعاشات اولتراسونیک با فرکانس ۲۰ کیلو هرتز و دامنه ۱۵ تا ۱۹ میکرون برای تنش‌گیری نمونه های دولایه از جنس فتور زیست 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 گردیده و پس از تنش‌گیری مقدار خمش کاهش یافت. تحقیقات لیگون نشان داد که با افزایش دامنه ارتعاشات، راندمان تنش-گیری افزایش می‌یابد و با افزایش زمان تنش‌گیری تا زمان ۱۰ دقیقه، راندمان تنش‌گیری افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. در تحقیقات انجام شده، آوکی و لیگون [۱۲]- [۱۱]، از ارتعاشات اولتراسونیک برای تنش‌گیری استفاده کردند، اما در تحقیقات آوکی [۱۱]، تنش‌های پسماند مرحله شکل‌گیری کاهش یافته و توزیع تنش‌های پسماند تغییر می‌کند. هدف تحقیق حاضر این است که روش بهینه اندازه-گیری تنش پسماند ناشی از جوشکاری توسط موج آلتراسونیک ارائه شود. در این راستا رابطه‌ای که نشانگر تغییرات سرعت انتشار امواج در جسم در حضور تنش پسماند باشد، استخراج شده است. در نهایت پس از محاسبه تنش پسماند از این امواج جهت حذف تنش‌های پسماند بهره گرفته شده است و رابطه اصلاح شده‌ای جهت نرخ رشد ترک خستگی ارائه گردید.

۲. اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوش کاری با روش آلتراسونیک

زاویه شکست بحرانی و یا به اختصار امواج LCR است. این روش محدودیتی از نظر جنس ماده‌ای که مورد بررسی قرار می‌گیرد ندارد و نیز برای اندازه‌گیری در قطعات ضخیم نیز مناسب است. اندازه‌گیری تنش پسماند با روش آلتراسونیک بر پایه خاصیت آکستوالاستیک مواد استوار است که بر اساس

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (4)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (5)$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (6)$$

$$\rho_0 V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + (21 + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_2 \quad (7)$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_2 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_1 \quad (8)$$

$$\rho_0 V_{31}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_3 + 2\mu\alpha_1 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (9)$$

$$\rho_0 V_{32}^2 = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_3 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_1 \quad (10)$$

$$\rho_0 V_{33}^2 = \lambda + 2\mu + (21 + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_3 \quad (11)$$

در روابط بالا α_1 ، α_2 ، α_3 بیانگر کرنش‌های اصلی، ρ_0 چگالی نخستین (با اعمال تنش، چگالی قطعه می‌کند)، μ و λ ثابت‌های الاستیک درجه دوم، m ، n و l ثابت‌های الاستیک درجه سوم، v_{ij} بیانگر سرعت موج آلتراسونیکی است که در آن اندیس i نشانگر جهت انتشار موج و اندیس j نشانگر جهت ارتعاش ذرات تحت تاثیر موج است و

$$\theta = \alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1$$

برای نمونه v_{23} بیانگر انتشار یا ارسال موج در جهت ۲ و حرکت ذرات حامل موج در راستای جهت ۳ است. از آن جا که موج طولی، موجی است که جهت انتشار آن با جهت ارتعاش ذره یکسان باشد؛ بنابراین بر این اساس، سرعت‌های v_{11} ، v_{22} و v_{33} نشانگر امواج طولی است که از این بین v_{11} سرعت موج طولی است که در راستای اعمال بار (امتداد جهت ۱) در قطعه منتشر می‌شود. سایر سرعت‌ها مربوط به امواج عرضی هستند که در آنها ذرات، عمود بر راستای انتشار موج، مرتعش می‌شوند.

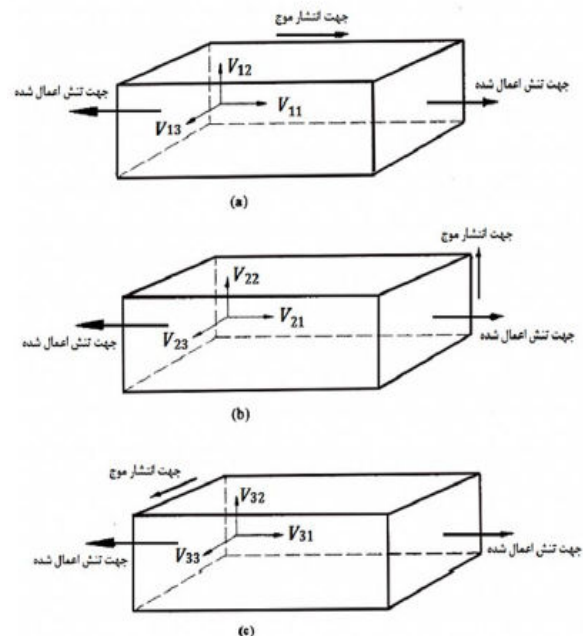
از دیدگاه میکروسکوپی، اعمال تنش به یک ماده جامد سبب تغییر مدول الاستیک، فاصله بین اتمی و چگالی آن می‌شود.

چنانچه هدف این باشد که موج طولی منکسرشده در محیط ۲، روی سطح قطعه بیفتد و در امتداد سطح قطعه حرکت کند باید زاویه انکسار موج طولی در محیط ۲ برابر با ۹۰ درجه شود؛ بنابراین طبق معادله اسنل، زاویه تابش موج طولی در محیط ۱ باید مقدار خاصی باشد که این زاویه تابش را زاویه بحرانی اول یا θ_{cr} می‌نامند. برای به دست آوردن این زاویه تابش، کافی است در رابطه اسنل به جای θ_L مقدار ۹۰ درجه قرار داده شود، آن گاه θ به دست آمده همان زاویه بحرانی نخست و فرمول آن به شکل رابطه (۲) خواهد بود.

$$\theta_{cr} = \sin^{-1}\left(\frac{C}{C_L}\right) \quad (2)$$

این موج طولی ایجادشده در سطح ماده ۲ که به موازات سطح منتشر می‌شود را همان موج طولی با زاویه شکست بحرانی یا موج LCR می‌گویند.

هوگس و کلی [۲]، با توجه به شکل ۳ معادلات مربوط به ارتباط سرعت‌های موج آلتراسونیک با کرنش الاستیک را در یک جسم ایزوتروپیک به صورت روابط (۳ تا ۱۱) بیان کردند.



شکل ۲- سرعت‌های مورد استفاده در روابط آکستو الاستیسیته

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad (3)$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \rho_0 V_{32}^2$$

$$= \mu + \left[(\lambda + m)(1 - 2v) - 6\mu \times v \left(\frac{n}{2} \right) \right] \varepsilon \quad (21)$$

برای محاسبه تغییرات سرعت موج نسبت به کرنش، کافی است از طرفین معادلات بالا نسبت به کرنش، مشتق بگیریم که معادلات (۲۲-۲۶) به دست می‌آیند.

$$\frac{dV_{11}/V_{11}^0}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\mu + 2m + \mu \times v(1 + 2l/\lambda)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (22)$$

$$\frac{dV_{12}/V_{12}^0}{d\varepsilon} = 2 + \frac{n \times v}{4\mu} + \frac{m}{2(\lambda + \mu)} = L_{12} \quad (23)$$

$$\frac{dV_{21}/V_{21}^0}{d\varepsilon} = \frac{\lambda + 2\mu + m}{2(\lambda + \mu)} + \frac{n \times v}{4\mu} = L_{21} \quad (24)$$

$$\frac{dV_{22}/V_{22}^0}{d\varepsilon} = -2v \left[1 + \frac{m - \mu l/\lambda}{\lambda + 2\mu} \right] = L_{22} \quad (25)$$

$$\frac{dV_{23}/V_{23}^0}{d\varepsilon} = \frac{m - 2\mu}{2(\lambda + \mu)} + \frac{n}{4\mu} = L_{23} \quad (26)$$

در روابط بالا L_{ij} را که نسبت تغییرات سرعت موج به تغییرات کرنش است، ثابت آکوستوالاستیک می‌گویند و اندیس ۰ نشانگر سرعت موج در حالتی است که ماده بدون کرنش و تغییر شکل باشد. L_{11} ضریب آکوستوالاستیک موج LCR است.

با استفاده از رابطه تنش-کرنش یک بعدی در مواد الاستیک می‌توان مقدار تغییرات تنش را با تغییر رابطه (۲۲) به طریق رابطه (۲۷) به دست آورد.

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11}^0)}{L_{11}} \quad (27)$$

در فرمول بالا $d\sigma$ تغییرات تنش و E مدول الاستیک است. رابطه (۲۷) را می‌توان برحسب زمان پرواز موج به صورت رابطه (۲۸) ارائه کرد که t_0 در رابطه (۲۸) بیانگر زمان پرواز موج در ماده بدون تنش و dt بیانگر تغییرات زمان پرواز موج به دلیل حضور تنش است.

$$d\sigma = \frac{E(dt/t_0)}{L_{11}} \quad (28)$$

این تغییرات نیز به سهم خود سبب تغییر در سرعت موج آلتراسونیک می‌شود. این یعنی در قطعه تحت تنش، رابطه تنش و کرنش خطی نیست و به صورت رابطه (۱۲) است.

$$\sigma = E\varepsilon + C\varepsilon^2 + D\varepsilon^3 + \dots \quad (12)$$

در رابطه با C و D به ترتیب ثابت‌های غیرهارمونیک مرتبه دوم و سوم که خود تابعی از ثوابت الاستیک درجه دوم و سوم است. در برخی از حالات از جملات غیرخطی صرف نظر می‌کنند، ولی در اکستولاستیسیته نه تنها از آنها صرف نظر نمی‌کنند بلکه آنها بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. با استفاده از ثوابت الاستیک درجه دوم، می‌توان مدول‌های مهندسی روابط (۱۳ تا ۱۵) را نیز به دست آورد.

$$G = \mu \quad (13)$$

$$E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu) \quad (14)$$

$$K = (3\lambda + 2\mu)/3 \quad (15)$$

در روابط بالا E, G, K به ترتیب مدول‌های برشی، یانگ و بالک است. در حالت تنش تک محوره که تنش در جهت ۱ به قطعه وارد می‌شود و کرنش در این جهت ε و ضریب پواسون ν است. معادلات سرعت که بالاتر بیان شد، به شکل روابط (۱۶-۲۱) در می‌آیند.

$$\alpha_1 = \varepsilon, \quad \alpha_2 = \alpha_3 = -\nu \times \varepsilon \quad (16)$$

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu \left[4(2\mu + \lambda) + 2(\mu + 2m) + v \times \mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda} \right) \right] \varepsilon \quad (17)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + \left[4\mu + m(1 - 2v) + v \left(\frac{n}{2} \right) \right] \varepsilon \quad (18)$$

$$\rho_0 V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2v) - 4v(m + \lambda + 2\mu)] \varepsilon \quad (19)$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \rho_0 V_{31}^2 = \mu + \left[(\lambda + 2\mu + m)(1 - 2v) + v \left(\frac{n}{2} \right) \right] \varepsilon \quad (20)$$

$$\frac{da}{dN} = c(K_{\max}(1-R))^m \quad (33)$$

بطوریکه در آن R بیانگر نسبت سیکل می باشد. حال اگر در جسم تنش پسماند داشته باشیم می توان تغییرات شدت تنش را بصورت زیر رابطه (۳۴) نمود.

$$\begin{aligned} \Delta K_{tot} &= \Delta K_{eff}^{max} - \Delta K_{eff}^{min} \\ &= (K_{ext}^{max} + K_{res}) - (K_{ext}^{min} + K_{res}) \\ &= \Delta K_{ext} \end{aligned} \quad (34)$$

باتوجه به رابطه (۳۳) می توان نوشت:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K_{ext}(1-R_{eff})^{m-1})^n \quad (35)$$

بطوریکه در آن نسبت سیکل موثر بصورت رابطه (۳۶) تعریف می شود.

$$R_{eff} = \frac{K_{ext}^{min} + K_{res}}{K_{ext}^{max} + K_{res}} \quad (36)$$

بنابراین می توان رابطه (۳۵) را بصورت رابطه (۳۷) بازنویسی نمود.

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K_{ext} \left(\frac{\Delta K_{ext}}{K_{ext}^{max} + K_{res}} \right)^{m-1})^n \quad (37)$$

۴. حذف تنش پسماند توسط امواج آلتراسونیک

ابتدا انتشار امواج حجمی در جسم دارای تنش پسماند را بررسی می کنیم. معادلات حرکت یک ذره با مختصات مادی x_i بدون در نظر گرفتن نیروی حجمی را می توان چنین نوشت:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho_0 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (38)$$

که در آن σ_{ij} مولفه های تانسور تنش در نقطه ρ_0 چگالی در حالت تغییر شکل نیافته، و u_i مولفه های جابجایی از x_i به مختصات x_i است.

قرارداد جمع روی اندیس تکراری برقرار بوده و $x_i = x_1 - x_3$ مشتق گیری از تابع چگالی انرژی کرنشی کشسانی جسم در حالت تغییر شکل نیافته (\emptyset) بر حسب مولفه ی کرنش

معادله بالا را می توان برای دیگر جهت ها نیز استفاده کرد. در نهایت برای اندازه گیری تغییرات تنش از روی تغییرات زمان پرواز موج، از رابطه (۲۹) استفاده می شود.

$$\Delta \sigma = \frac{E}{L \times t_0} \Delta t = \frac{E(t - t_0)}{L \times t_0} \quad (29)$$

در رابطه بالا، L ضریب آکستوالاستیک ماده است که به صورت تجربی و با انجام تست کشش تک محوره برای هر ماده اندازه گیری می شود، همچنین در معادله بالا، t زمان پرواز موج در ماده تحت تنش و t_0 زمان پرواز موج در همان ماده ولی در حالت بدون تنش است.

۳. پیش بینی عمر خستگی در میدان تنش پسماند کششی

۳.۱. ضریب شدت در میدان تنش پسماند کششی

زمانی که در ماده ای تنش پسماند داشته باشیم، ضریب شدت تنش موثر K_{eff} مطابق اصل جمع آثار بصورت مجموع ضریب شدت تنش ناشی از بارگذاری سیکلی و تنش پسماند مطابق رابطه (۳۰) تعریف می شود.

$$K_{eff} = K_{ext} + K_{res} \quad (30)$$

در جایکه ضریب شدت تنش ناشی از بارگذاری سیکلی بصورت رابطه (۳۱) تعریف می شود.

$$K_{ext} = f\left(\frac{a}{w}\right) \sigma_{ext} \sqrt{\pi a} \quad (31)$$

و ضریب شدت تنش ناشی از تنش پسماند با استفاده از تابع وزن مناسب از طریق رابطه (۳۲) حاصل می شود.

$$K_{res} = \int W(x, a) \sigma_{res}(x) dx \quad (32)$$

۳.۲. نرخ رشد ترک خستگی در میدان تنش پسماند کششی

والکر [۷]، برای محاسبه نرخ رشد ترک خستگی از رابطه (۳۳) استفاده نمود.

مشروط بر آن که نامساوی (۴۴) برقرار باشد:

$$u_i^{Static} \gg u_i^{Dynam} \quad (44)$$

با این فرض که حرکت موج هارمونیک باشد، می توان معادله (۴۳) را به صورت معادل (۴۵) نوشت:

$$u_i = \varepsilon_i X_i + m_i A e^{i(\omega t - k_j x_j)} \quad (45)$$

که در آن ε_i کرنش های اصلی، ω فرکانس، m_i کسینوس های هادی بردار جابجایی با محورهای اصلی، A دامنه جابجایی و k_j مولفه های بردار موج است و قرارداد جمع فقط روی اندیس مکرر j صادق است. جمله اول نشانگر جابجایی کشسان اولیه در جسم جامد همسانگردی است که تحت میدان تنش قرار گرفته است. جمله دوم نشانگر تغییر شکل بسیار کوچکی است که بر اثر انتشار موج صفحه ای از میان یک جسم ناهمسانگرد به وجود آمده است.

از موج آلتراسونیک جهت حذف تنش پسماند استفاده نمود بطوریکه میدان تنش بوجود آمده توسط این امواج با تنش پسماند موجود در جسم جمع شده و بخش عمده ای از آنها از حد پلاستیک، تجاوز نموده، قسمت قابل توجهی از تنش های پسماند کششی آزاد می شود و در نهایت حذف و به تنش پسماند فشاری تبدیل می شود.

بدین منظور از موج آلتراسونیک طولی بصورت چند پالسه استفاده می گردد. میدان تنش بوجود آمده را می توان توسط رابطه (۴۶) بدست می آیند.

$$U = 2A \cos\{0.5\Delta KX - 0.5\Delta Wt\} \cdot \cos(KX - Wt) \quad (46)$$

یا بصورت مجموعه ای از جملات رابطه (۴۷) نوشت:

$$U = \sum_i^n A_i \cos(k_i x - w_i t) \quad (47)$$

قانون هوک مطابق رابطه (۴۸) بیان می شود.

$$\sigma_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2\mu E_{ij} \quad (48)$$

$$\sigma_x = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial U}{\partial x}$$

لذا می توان رابطه (۴۸) را بر حسب رابطه (۴۷) نوشت.

محدود لاگرانژی (E) به صورت معادله ی (۳۹) نوشته می - شود:

$$[\sigma] = [J] \left[\frac{\partial \varphi}{\partial E} \right] \quad (39)$$

تانسور کرنش محدود لاگرانژی بر حسب ژاکوبین (J) و تانسور واحد (I) نیز به صورت معادله ی (۴۰) نوشت می - شود:

$$E = \frac{1}{2} (J^T J - I) \quad (40)$$

ماتریس ژاکوبین از رابطه (۴۱) قابل محاسبه است:

$$[J] = \left[\frac{\partial x_i}{\partial X_i} \right] \quad (41)$$

چگالی انرژی کرنشی برای یک جامد کشسان همسانگرد به صورت تابعی از سه مقدار پایای I_3, I_2, I_1 تانسور کرنش لاگرانژی نوشته می شود:

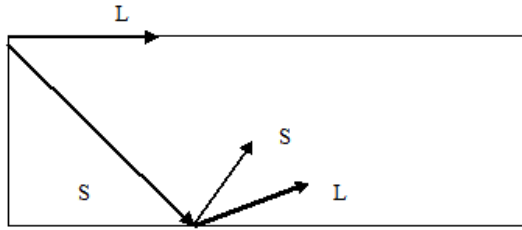
$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1+2m}{3} I_1^3 + \frac{\lambda+2\mu}{2} I_1^2 - 2m I_1 I_2 \\ &- 2\mu I_2 + n I_3 \end{aligned} \quad (42)$$

که در آن J و m و n سه مقدار ثابت جدید ماده به نام ثابت های کشسانی مرتبه ی سوم هستند که با آزمایش باید تعیین شوند .

با قرار دادن معادلات (۴۰) تا (۴۲) در معادله (۳۹) و جایگزینی عبارت های حاصل برای تنش در معادله (۳۸)، معادلات حرکت غیرخطی در جهت های X_3, X_2, X_1 به دست می آید.

اگر جابجایی هر نقطه ترکیبی از دو بخش در نظر گرفته شود:
۱. بخش استاتیکی (u_i^{Static}) که ممکن است بر اثر وجود یک میدان تنش پسماند یا تنش اولیه ایجاد شده باشد؛
۲. بخش دینامیکی ($u_i^{Dynamic}$) که بر اثر انتشار امواج صفحه ای کم دامنه به وجود می آید، مولفه های جابجایی در مختصات کارتزین را می توان چنین نوشت:

$$u_i^{Total} = u_i^{Static} + u_i^{Dynam} \quad (43)$$



شکل ۴- انعکاس موج در محیط ۲

لذا رابطه (۴۸) را می توان بصورت رابطه (۵۵-۵۴) نوشت.

$$\sigma_x = \lambda \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} \right) \quad (54)$$

$$\sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \quad (55)$$

۵. پیش بینی عمر خستگی (در حالتی که تنش

پسماند در حال حذف شدن است)

همانطور که گفته شد تنش پسماند کششی به مرور توسط امواج آلتراسونیک حذف می شود لذا ضریب شدت تنش ناشی از تنش پسماند مطابق رابطه (۳۲) بدلیل تغییر توزیع تنش پسماند در حال تغییر است. در نتیجه مطابق رابطه (۳۶) نسبت سیکل موثر و در نهایت مطابق رابطه (۳۷) نرخ رشد ترک خستگی نیز در حال کاهش است. لذا در هر مرحله حذف تنش پسماند، نرخ رشد ترک خستگی بصورت رابطه (۵۶) بدست می آید:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K_{ext} \left(\frac{\Delta K_{ext}}{K_{ext}^{max} + K_{res}^t} \right)^{m-1})^n \quad (56)$$

که در آن K_{res}^t ضریب شدت تنش ناشی از میدان تنش پسماند لحظه ای است.

پس از حذف کامل تنش های پسماند کششی، یک ناحیه پلاستیک تشکیل می شود که منجر به ایجاد تنش های پسماند فشاری می گردد. لذا ضریب شدت تنش ناشی از تنش های پسماند کششی K_{res} کاملا حذف و ضریب شدت تنش ناشی از تنش های پسماند فشاری K_{res}^c جایگزین آن می-شود. بنابراین رابطه ضریب شدت تنش موثر بصورت رابطه (۵۷) اصلاح می گردد:

$$K_{eff} = K_{ext} - K_{res}^c \quad (57)$$

$$\sigma_x = (\lambda + 2\mu) \sum_i^n i A_i k_i e^{(k_i x - w_i t)} \quad (49)$$

از آنجا که موج LCR یک موج طولی است بنابر معادله ناویر(۵۰) و تجزیه هلمهولتز(۵۱) را می توان مطابق معادلات (۵۲) نوشت:

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot U + \mu \nabla^2 U = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (50)$$

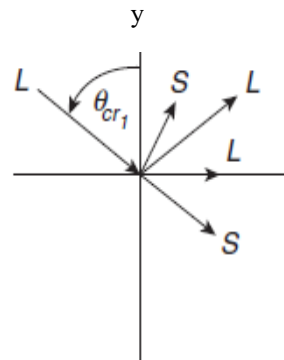
$$U = \nabla \phi + \nabla \times H \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \nabla &= \left[(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right] + \nabla \\ &\times \left[\mu \nabla^2 H - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (52)$$

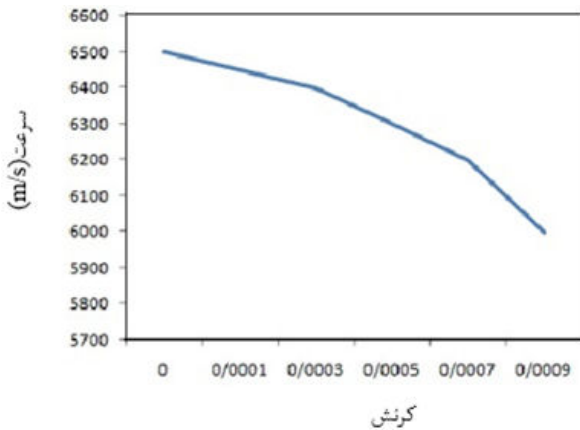
از آنجا که هر ترم معادله (۵۲) برابر صفر است، می توان نوشت:

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \rightarrow \nabla^2 \phi = \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\ \mu \nabla^2 H - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \rightarrow \nabla^2 H = \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \end{cases} \quad (53)$$

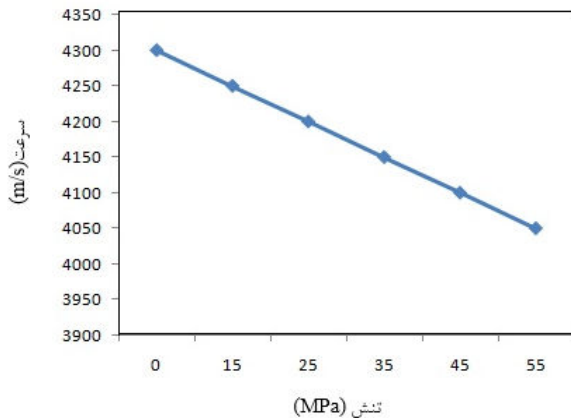
از طرفی دیگر می دانیم که موج LCR مطابق شکل (۳) موازی با سطح منتشر می گردد و در محیط ۲ فقط موج عرض داریم که این موج عرضی با برخورد در هر سطح در ماده ۲ مطابق شکل (۴) به صورت موج های طولی و عرضی منعکس می گردد. با ادامه این روند مجموعه ای از موج ها را داریم که با هم حرکت می کنند.



شکل ۳- نمایش موج LCR

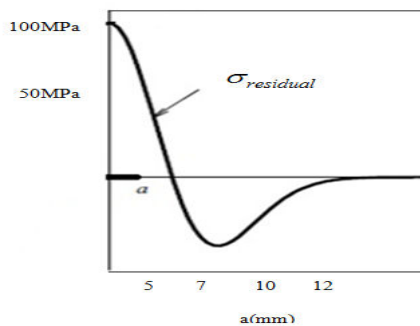


شکل ۶- تغییرات سرعت امواج طولی در آلیاژ 2024-T351

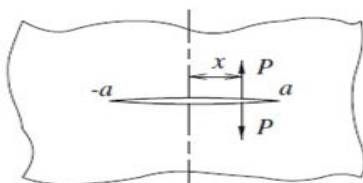


شکل ۷- تغییرات سرعت امواج طولی در آلیاژ 2024-T351

توزیع تنش پسماند طولی در این اتصال در راستای خط جوش مطابق شکل (۸) بدست آمده است. همچنین نحوه قرارگیری ترک مطابق شکل (۹) آمده است.



شکل ۸- نحوه توزیع تنش پسماند طولی



شکل ۹- ترک واقع در وسط ورق

و در نتیجه رابطه رشد ترک خستگی بصورت رابطه (۵۸) اصلاح می گردد.

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K_{ext} (1 - R_{eff}^C)^{m-1})^n \quad (58)$$

که در آن نسبت سیکل موثر فشاری بصورت رابطه (۵۹) اصلاح می گردد.

$$R_{eff} = \frac{K_{ext}^{min} + K_{res}^C}{K_{ext}^{max} + K_{res}^C} \quad (59)$$

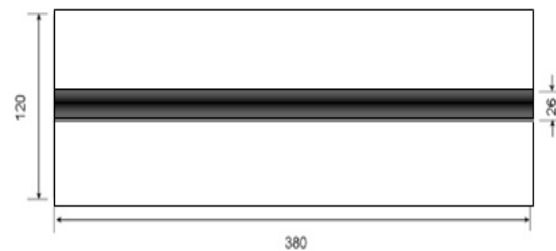
۶. مطالعه موردی

همانطور که گفته شد، موج LCR یک موج طولی می باشد که در صورتی که تنش تک محوره در جهت (۱) به قطعه مطابق شکل (۲) وارد گردد بصورت رابطه (۱۷) می توان ارتباط سرعت موج LCR با کرنش الاستیک را بدست آورد. در جدول یک برای این آلیاژ ثابت های کشسانی مرتبه دوم و سوم آورده شده است.

جدول ۱- ثابت های کشسانی مرتبه دوم و سوم آلیاژ 2024-T351 برحسب گیگا پاسکال

ν	E	μ	λ	n	m	l
0.34	73	27	60	-408	-400	-310

همچنین در شکل (۵) نحوه جوشکاری لب به لب دو ورق از این جنس را به همراه مشخصات هندسی و مکانیکی نشان می دهد.



شکل ۵- جوشکاری لب به لب دو ورق از جنس آلیاژ 2024-T351

$$(\sigma_y = 325MPa, \sigma_u = 470MPa)$$

براساس رابطه های (۲۲) و (۲۹) تغییرات سرعت موج نسبت به کرنش و تنش به ترتیب در شکل های (۶) و (۷) آمده است.

$$\frac{da}{dN} = 1.8 \times 10^{-10} (\Delta K_{eff})^{3.5} \quad (61)$$

برای این حالت در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نحوه اثر گذاری میدان تنش پسماند را روی ضریب شدت تنش و نرخ رشد ترک خستگی را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها تغییرات ضریب شدت تنش و نرخ رشد ترک خستگی را برای طول-های مختلف ترک، در حالت‌های مختلف حضور و عدم حضور میدان تنش‌های پسماند نشان می‌دهد.

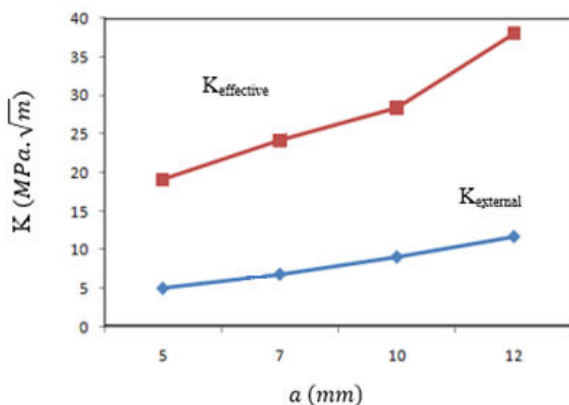
براساس شکل (۹) می‌توان تابع وزن را بصورت رابطه (۶۰) و ضریب شدت تنش ناشی از میدان تنش‌های پسماند کششی را از رابطه (۳۲) بدست آورد.

$$W(a,x) = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \left(\frac{a+x}{a-x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (60)$$

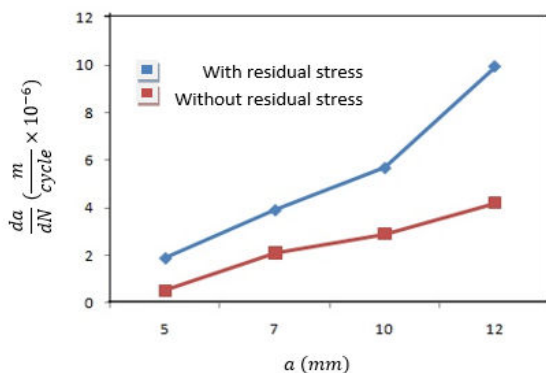
در جدول (۲) برای طول‌های مختلف ترک در نظر گرفته شده، ضریب شدت تنش ناشی از بارگذاری سیکلی ($\Delta\sigma = 40MPa, R = 0$)، ضریب شدت تنش موثر بر اساس رابطه‌های (۳۰ و ۳۱) و نرخ رشد ترک براساس رابطه (۶۱) بدست آمده است.

جدول ۲- نتایج مطالعه موردی

a (mm)	$K_{ext}(MPa\sqrt{m})$	$K_{res}(MPa\sqrt{m})$	$K_{eff}(MPa\sqrt{m})$	$\frac{da}{dN} (m/cyde)$
۵	۵/۱	۹	۱۴/۰۱۱	$1/۸۹ \times 10^{-6}$
۷	۵/۹	۱۱/۵	۱۶/۴۳	$۳/۹۱ \times 10^{-6}$
۱۰	۷/۱	۱۲/۳	۱۹/۳۸	$۵/۶۸ \times 10^{-6}$
۱۲	۷/۷	۱۸/۶	۲۶/۳۶	$۹/۹۴ \times 10^{-6}$



شکل ۱۰- نحوه تغییرات ضریب شدت تنش



شکل ۱۱- نحوه تغییرات نرخ رشد ترک خستگی

جهت کاهش تنش پسماند توسط موج آلتراسونیک و براساس روابط بیان شده در بخش (۴)، با فرکانس طبیعی قطعات مورد نظر در مدت ده دقیقه منجر به کاهش ۲۰ درصدی کاهش تنش پسماند می‌گردد. در جدول (۳) ضریب شدت تنش موثر و نرخ رشد ترک محاسبه شده در این حالت را برای طول ترک ۵ میلی‌متر و بارگذاری سیکلی مفروض نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که عمر خستگی به میزان ۳۱ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۳- ضریب شدت تنش و نرخ رشد ترک خستگی بعد ۲۰

درصد کاهش تنش پسماند

a (mm)	$K_{res}(MPa\sqrt{m})$	$\frac{da}{dN} (m/cyde)$	Fatigue Life (%)
۵	۷/۲	$1/1 \times 10^{-6}$	+۳۱٪

[10] MC Sun, YH Sun, RK Wang., "Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel." *Materials Letters*, **8** (2004) 1396-1399.

[11] S Hirai, S Aoki., "Reduction of Residual Stress by Ultrasonic Surface Vibration." *Elektronika ir Elektrotechnika*, **3** (2003) 64-67.

[12] L Du, Q Wang "Experimental study on ultrasonic stress relief for cured SU-8 photoresist layer." *Microelectronic Engineering*, **12** (2010) 2555-2560

۷. نتیجه گیری

در این مقاله، قابلیت روش آلتراسونیک با استفاده از موج طولی با زاویه شکست بحرانی یا موج LCR، در اندازه گیری و حذف تنش پسماند ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است. دو ورق از جنس آلیاژ 2024-T351 به یکدیگر جوش داده شده اند. نتایج نشان می دهد که این روش جهت محاسبه و حذف تنش پسماند بسیار مناسب است. اگر امتداد تنش موج و تنش یکسان باشد در حالت کششی، سرعت موج طولی کاهش می یابد. همچنین تغییرات سرعت موجی برای امواج طولی که در امتداد تنش منتشر می شوند نسبت به سایر مودها بیشتر است. جهت تنش زدایی با یک فرکانس مشخص با افزایش دامنه می توان ناحیه پلاستیکی بزرگتری را ایجاد کرد و این امر منجر به نرم شدگی آکوستیکی ماده می گردد. همچنین در این مقاله روابط اصلاح شده ای برای محاسبه ضریب شدت تنش و نرخ رشد ترک خستگی در حالتی که میدان تنش های پسماند در حال کاهش هستند معرفی گردیده است. از این روابط می توان جهت محاسبه لحظه ای نرخ رشد ترک بر اساس کاهش درصدی تنش پسماند بهره برد.

مرجع ها

- [1] F.D. Murnaghan, " Finite deformations of an elastic solid." *American Journal of Mathematics*, **2** (1937) 235-260.
- [2] D.S.Hughes and J.Kelly, Second-order elastic deformation of solids." *Physical review*, **5** (1953) 1145.
- [3] McGoldrick R. T., "Experiments in stress relieving castings and welded structures by vibration." *Journal of the american society of naval engineers*, **4** (1943) 589s-609s.
- [4] GP Wozney, GR Crawmer., "An investigation of vibrational stress relief in steel." *Welding Journal*, **9** (1968): 411s-418s.
- [5] IK Lokshin, Vibration treatment and dimensional stabilization of castings. *Russ cast prod.* **10** (1965) 454-457.
- [6] R Dawson, DG Moffat., Vibratory stress relief: a fundamental study of its effectiveness. (1980) 169-176.
- [7] CA Walker, AJ Waddell, DJ Johnston. "Vibratory stress relief—an investigation of the underlying processes." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **1** (1995) 51-58.
- [8] GC Luh, RM Hwang., Evaluating the effectiveness of vibratory stress relief by a modified hole-drilling method." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **14** (1998) 815-823.
- [9] A Munsif, AJ Waddell, CA Walker., "The influence of vibratory treatment on the fatigue life of welds: A comparison with thermal stress relief." *Strain*, **4** (2001) 141-149.