

تنش پسماند در جوشکاری لیزر آلیاژ تیتانیوم TC4 بر اساس فناوری لیزر اولتراسونیک

چکیده

جوشکاری لیزر به دلیل تراکم انرژی بالای آن، منطقه کوچک تحت تأثیر حرارت قرار گرفته و توانایی پردازش سریع، در جوشکاری آلیاژ تیتانیوم بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، مشکلات مربوط به جوشکاری لیزر از قبیل تغییر شکل و ترک خوردگی ناشی از تنش پسماند باید برطرف شود. در این مقاله، تنش پسماند در جوشکاری لیزر آلیاژ تیتانیوم TC4 با استفاده از لیزر اولتراسونیک مورد بررسی قرار گرفت. تنش پسماند در صفحات آلیاژ تیتانیوم به صورت حالت تنش صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود. روش بارگذاری پیش از تنش ارائه شده و ضرایب آکوستیک بدست می‌آید. بر اساس ضرایب شناخته شده آکوستوالاستیک، تنش‌های پسماند عرضی و طولی در جوشکاری لیزر با استفاده از لیزر اولتراسونیک اندازه‌گیری می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تنش پسماند طولی بزرگتر از تنش عرضی است. توزیع منظم تنش پسماند شبیه جوش معمولی است، اما ناحیه تنش کششی بسیار باریک‌تر است. سپس، در مورد تأثیر ورودی حرارت و سرعت جوشکاری بر تنش پسماند بحث شده است. با افزایش ورودی حرارت، ناحیه جوشکاری گسترده شده و مقدار پیک تنش پسماند افزایش می‌یابد. در صورت ثابت بودن قدرت جوشکاری، سرعت جوشکاری بالاتر باید انتخاب شود. این تحقیق برای اندازه‌گیری و کنترل تنش پسماند در فرآیند جوشکاری لیزر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

کلمات کلیدی: لیزر اولتراسونیک؛ لیزر جوشکاری؛ تنش پسماند؛ آلیاژ تیتانیوم.

۱. مقدمه

خواص مکانیکی دما بالا، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خوب در برابر خوردگی تیتانیوم و آلیاژهای تیتانیوم باعث کاربرد متنوع و موفقیت آمیز آن در زمینه‌های مختلف با تقاضای عملکردی و الزامات قابلیت اطمینان از قبیل هوافضا، اتومبیل، پزشکی، هسته‌ای، پتروشیمی و صنایع تولید برق شده است [1,2]. روش‌های متداول جوشکاری آلیاژ تیتانیوم شامل جوشکاری گاز بی اثر تنگستن، جوشکاری پرتو الکترونی و جوشکاری لیزر است. جوشکاری لیزر به دلیل تراکم انرژی متمرکز آن، منطقه کوچک تحت تأثیر حرارت قرار گرفته (HAZ)، حداقل تغییر شکل

در حین جوشکاری و سرعت سریع جوشکاری؛ یک روش جوشکاری غالب است. فناوری جوشکاری لیزر برای جوشکاری آلیاژ تیتانیوم TC4 مناسب است [3,4]. در حین جوشکاری با لیزر، تنش پسماند، ناگزیر از گرم شدن و سرد شدن غیر یکنواخت و سریع ناشی می‌شود و بر عملکرد ایمنی سازه‌های جوش داده شده تأثیر می‌گذارد. با این حال، با توجه به محدودیت‌های فن‌آوری و روش‌های آزمایش موجود، مکانیسم تشکیل تنش پسماند در جوشکاری لیزر هنوز به طور موثری حل نشده است. روش‌های سنتی اندازه‌گیری تنش پسماند شامل شیارزنی شعله‌ای^۱، سوراخ کاری و اشعه ایکس است [5-7]. با این حال، روش مکانیکی وقت‌گیر و پیچیده بوده و می‌تواند به مواد آسیب برساند. روش اشعه ایکس شامل اندازه‌گیری کنترل شده بوده و احتمال آسیب رساندن به سلامتی انسان در آن کم است. لیزرهای اولتراسونیک از مزیت بالایی برخوردار بوده زیرا بسیار دقیق، بدون تماس، غیر مخرب و به شدت سازگار هستند. این فناوری خصوصاً برای آزمایش غیر مخرب مواد با سطوح پیچیده خمیده حتی در محیط‌های خشن مناسب است. از فن‌آوری لیزر اولتراسونیک به طور گسترده‌ای در تشخیص نقص [8,9] و اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شده است [10-13].

بسیاری از محققان به دلیل داشتن مزایای برجسته در اندازه‌گیری تنش پسماند، جذب فناوری لیزر اولتراسونیک شده‌اند. Duquennoy و همکاران [10] تنش پسماند سطحی در میله‌های فولادی را همراه با فرآیندهای مختلف عملیات حرارتی با استفاده از موج سطحی اولتراسونیک ناشی از لیزر اندازه‌گیری کردند. رویز و نگی [11] انتشار موج سطحی تولید شده توسط تنش پسماند را مورد بحث قرار دادند. نتایج نشان داد که اصلاح پراش می‌تواند برای بهبود دقت اندازه‌گیری‌های انتشار موج سطحی معرفی شود. بر اساس مکانیسم کندگی لیزر^۲، بسکاند و همکاران [12] تنش پسماند را با استفاده از امواج طولی رویه‌گیری^۳ سطحی ایجاد شده توسط لیزر، اندازه‌گیری کردند. اگرچه این روش به سطح نمونه آسیب می‌زد، اما دقت اندازه‌گیری بالا بود. داکس بک و همکاران [13] تنش پسماند را در نمونه‌های فولادی پیش تنش‌کاری شده^۴ با استفاده از امواج طولی خزش ایجاد شده توسط لیزر تعیین کردند. مورو و من [14] تنش پسماند را در یک نمونه آلومینیومی ۷۵-۷۰ T651 که سطح آن با صیقل

^۱cutting groove

^۲ laser ablation

^۳skimming

^۴autofrettaged

دادن پلاستیسیته کم با استفاده از یک لیزر اولتراسونیک اصلاح شده، اندازه‌گیری کردند. دونگ و همکاران [15] از امواج سطحی ایجاد شده توسط لیزر برای تعیین توزیع سرعت در اطراف اتصال یک ورق آلیاژ آلومینیوم جوش داده شده با لیزر استفاده کردند، که از آن پروفیل تنش پسماند اصلی بر اساس تئوری آکوستوالاستیک محاسبه می‌شود. کارابوتوف و همکاران [16] مبدل نوری اکوستیکی مخصوص را برای تحریک و تشخیص پالس اولتراسونیک طراحی کردند. از این فن‌آوری برای اندازه‌گیری تنش پسماند نمونه‌های فولادی ضد زنگ جوش داده شده الکترونیکی استفاده شد. نتایج مطابق با رویکردهای متعارف بود. مدل المان محدود ساده (FEM) توسط ساندرسون و شن [17] برای تعیین حساسیت و قابلیت فن‌آوری لیزر اولتراسونیک برای اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شد. امکان پروفیل‌سازی عمیق برای اعماق زیر سطح تا ۰٫۳ میلی متر برای مورد خاص مورد مطالعه، نشان داده شد. بسیاری از محققان در مورد جوشکاری لیزر و عملیات حرارتی برای آزادسازی تنش پس از جوشکاری تحقیق کرده‌اند. فرناندز و همکاران [18] برای تعیین پارامترهای جوشکاری بهینه در فولاد دو فازی از لیزر Nd: YAG (Neodymium Yttrium Alumin Garnet) استفاده کردند و عملیات حرارتی برای کاهش سختی HAZ استفاده شد. لیائو و همکاران [19] اثر پارامترهای جوشکاری لیزر را بر نفوذ و مشخصه‌یابی ریزساختار اتصال لب به لب فولاد DP1000 بررسی کردند. نتایج نشان داد که پارامترهای فرآیند تأثیر قابل توجهی در نفوذ جوش دارند و منطقه ذوب اتصالات لب به لب، سختی بیشتری نسبت به فلز پایه و اتصالات لب به لب HAZ نشان می‌دهد. لی و همکاران [20] قابلیت جوشکاری در طول جوشکاری لیزر الیاف با قدرت بالا ۱۰ kW در فولاد ضدزنگ ۳۰۴ با سه نوع گاز محافظ را بررسی کرده‌اند. گاز محافظ مناسب باید مطابق با درخواست کاربرد و شرایط جوشکاری انتخاب شود. پوپسکو و همکاران [21] مکانیسم بازخورد را برای شناسایی سریع پارامترهای لیزر بهینه در جوشکاری نوارهای AlMg5 با استفاده از نظارت زمان واقعی توسط تصویربرداری با سرعت بالا گزارش کردند. بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند جوشکاری لیزر Nd: YAG برای انتهای لوله‌های تیتانیوم کوچک آب‌بندی شده توسط لی و همکاران ارائه شده است [22]. اثر پارامترهای جوشکاری لیزر بر روی طول ذوب شده با استفاده از روش تاگوچی و آنالیز رگرسیون، تحلیل و بهینه‌سازی شد.

در این مقاله، فناوری لیزر اولتراسونیک، روشی غیر تماسی با استفاده از لیزر برای تولید و تشخیص امواج اولتراسونیک، برای اندازه‌گیری تنش پسماند در جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیوم TC4 استفاده شده است. این

فناوری بر پایه‌ی تعیین تغییر سرعت موج اولتراسونیک کوچک ناشی از تنش است. تنش پسماند صفحه آلیاژ تیتانیوم TC4 به صورت حالت تنش صفحه‌ای ساده می‌شود. روشی برای بارگذاری پیش از تنش ارائه شده و ضرایب آکوستوالاستیک بدست آمده است. توزیع تنش پسماند اندازه‌گیری شده با نتایج اندازه‌گیری‌های کرنش سنج مقایسه می‌شود. سپس، تأثیر ورودی حرارت، سرعت جوشکاری و عملیات حرارتی بر تنش پسماند بحث شده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر ورودی حرارت بر تنش پسماند قابل توجه است. با افزایش ورودی حرارت، مقدار پیک تنش پسماند افزایش می‌یابد. هنگامی که نیروی جوشکاری ثابت باشد، سرعت‌های جوشکاری سریع‌تر ترجیح داده می‌شود. عملیات حرارتی می‌تواند تنش پسماند را تا حدودی کاهش دهد، اما هنوز هم کنترل تنش پسماند توسط بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند جوشکاری، ضروری است. سهم این مقاله برای بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری لیزر و ارزیابی تنش پسماند از اهمیت برخوردار است.

۲. مبانی نظری

تأثیر اصلی تنش در انتشار امواج فراصوت در یک ماده، تغییر در سرعت موج انتشار است [23]. اثر دیگر، تا حدی کمتر، تغییر در دامنه موج فراصوت است که مطابق با میرایی آن‌ها قابل تعیین است [24]. معمولاً تغییر نسبی در سرعت ناشی از تنش، متناسب با مورد دوم است و ضریب تناسب پارامتر وابسته به ماده است که به آن ضریب آکوستوالاستیک گفته می‌شود [25]. هنگامی که تنش در نزدیکی سطح قرار دارد، به جای اینکه موج از طریق ضخامت ماده انتشار یابد، می‌توان انرژی موج را در امتداد سطح بین فرستنده و گیرنده هدایت کرد. در میان امواجی که در نزدیکی سطح انتشار می‌یابند، موج سطحی بسیار جذاب است، زیرا بدون اتلاف تشعشع انتشار یافته و انرژی در لایه‌ای با ضخامت تقریباً یک طول موج در زیر سطح متمرکز می‌شود. برخی مطالعات حساسیت این امواج را نسبت به تنش در مواد مختلف نشان داده‌اند [26,27]. از آنجا که عمق نفوذ موج سطحی در جامد تقریباً به اندازه یک طول موج است، می‌توان گرادیان تنش را با استفاده از امواج سطحی در فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری کرد [28]. اولین تئوری امواج سطحی در مواد الاستیک با تغییر شکل همگن توسط هیز^۵ و ریولین^۶ برای انتشار امواج در امتداد یکی از محورهای اصلی تنش ایجاد شده است [29]. اثر تئوری آکوستوالاستیک برای موج سطحی

^۵Hayes

^۶Rivlin

اولتراسونیک توسط پائو و همکاران بررسی شد. فقط نتایج نهایی در اینجا ارائه شده است. با توجه به مطالعه تنش پسماند جوشکاری لیزر یک ورق ایزوتروپیک^۷ و یکنواخت، در مقایسه با دو جهت دیگر، تنش در طول جهت ضخامت بسیار اندک بود. ما $\sigma_z = 0$ را تقریب زدیم و مدل را می‌توان به حالت تنش صفحه‌ای ساده کرد. در این مقاله، انتشار موج سطحی بر روی سطح آزاد یک محیط الاستیک و ایزوتروپیک تعریف شده توسط مختصات صفحه‌ای معمولی (x,y) در نظر گرفته شده است. بر اساس بحث در مورد تأثیر آکوستوالاستیک موج سطحی انجام شده توسط هوسون [۳۱]، هنگامی که جابجایی ناشی از انتشار موج سطحی بی‌نهایت است، می‌توان تغییر نسبی در سرعت انتشار را به عنوان تابعی از دو تنش سطحی غیر صفر بیان کرد، σ_x و σ_y ، به شرح زیر:

$$\frac{\Delta v_x}{v_0} = \frac{v_x - v_0}{v_0} = A_x \sigma_x + A_y \sigma_y \quad (1)$$

$$\frac{\Delta v_y}{v_0} = \frac{v_y - v_0}{v_0} = A_x \sigma_y + A_y \sigma_x \quad (2)$$

در اینجا v_0 سرعت موج آکوستیک سطحی بدون تنش پسماند است؛ v_x و v_y سرعت‌های موج سطحی در حضور (σ_x, σ_y) در جهات x و y هستند؛ σ_x و σ_y تنش‌های اصلی هستند؛ A_x و A_y ضرایب آکوستوالاستیک موج التراسونیک سطحی بوده که نه تنها به جهت تنش وابسته هستند، بلکه به جهت انتشار موج نیز وابسته می‌باشند. ضرایب آکوستیک با توجه به پارامترهای مکانیکی مواد قابل ارزیابی است [32]. با توجه به تفاوت بین آزمایش و تئوری، به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، یک روش بارگذاری پیش تنش برای کالیبراسیون ضرایب در آزمایش ارائه شده است. برای دستیابی به وارونگی تنش، ضرایب A_x و A_y را باید از قبل تعیین کرد. برای میدان‌های تنش کششی تک محوره، فقط σ_x پیش تنش اعمال می‌شود؛ ضرایب A_x و A_y را می‌توان از آزمایش کالیبراسیون بدست آورد. هنگامی که نمونه در حالت تنش تک محوره قرار دارد، معادلات (۱) و (۲) به ترتیب زیر ساده می‌شوند:

$$\frac{\Delta v_x}{v_0} = \frac{v_x - v_0}{v_0} = A_x \sigma_x \quad (3)$$

$$\frac{\Delta v_y}{v_0} = \frac{v_y - v_0}{v_0} = A_y \sigma_x \quad (4)$$

این مرحله از کالیبراسیون شامل اعمال بارهای مختلف بر روی نمونه و اندازه‌گیری سرعت‌های موج آکوستیک

^۷isotropic

مربوطه است. نتایج تجربی، تکامل خطی تغییر نسبی سرعت را به عنوان تابعی از بار تأیید کرد و شیب مستقیماً با ضرایب آکوستوالاستیک مطابقت دارد. از معادلات (۳) و (۴)، برای یک پیش تنش قطعی، اگر سرعت انتشار موج سطحی در امتداد جهات x و y اندازه‌گیری شود، به ترتیب ضرایب آکوستوالاستیک A_x و A_y را بدست می‌آوریم.

۳. فرآیند آزمایشی

فرآیند آزمایشی به سه بخش تقسیم شده است: تهیه نمونه‌هایی با جوشکاری لیزر پیوسته، استفاده از فناوری لیزر اولتراسونیک برای اندازه‌گیری تنش پسماند در جوشکاری لیزر، و سوراخ کاری برای تأیید نتایج آزمایشگاهی.

۱.۳. تهیه نمونه‌های آزمایشی

برای اطمینان از کیفیت جوشکاری، کارهای مقدماتی لازم است. استاندارد ملی GB/T3621 استفاده شده است، و هر چیزی فراتر از خراش‌های استاندارد، تورفتگی، فرورفتگی و ترک‌ها در سطح نمونه مجاز نیستند. نمونه باید قبل از جوشکاری اصلاح شود و ترکیب عملیات انحلال HNO_3 (۳۰٪-۴۰٪)، HF (۳٪) و آب (مابقی) بود. دمای عملیات انحلال ۲۰-۳۰ درجه سانتیگراد، و زمان اصلاح ۵-۳ دقیقه بود. سپس نمونه به مدت ۳ دقیقه با آب سرد شسته شده و در یک جعبه خشک در دمای ۸۲ تا ۱۱۶ درجه سانتیگراد خشک شد. از کاغذ سنباده برای صیقل دادن لایه اکسیدی روی سطح به منظور جوشکاری نمونه استفاده شد. تا زمانی که سطح نمونه به درخشش فلزی سفید نقره‌ای پولیش نشود، از استون برای تمیز کردن آن استفاده می‌شود. جوشکاری لیزر یک روش جوشکاری با دقت بالا است، بنابراین برای محیط کار الزامات خاصی وجود دارد. دمای اتاق باید در دمای ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد نگه داشته شود و رطوبت نسبی نباید از ۶۰٪ تجاوز کند. برای اطمینان از پایداری لیزر، نوسان ولتاژ منبع تغذیه جوشکاری باید کمتر از ۱۰٪ باشد. برای اطمینان از پایداری نمونه‌ها در فرآیند جوشکاری، باید از فیکسچر مخصوص برای ثابت کردن نمونه‌ها استفاده شود. در پشت فیکسچر، باید یک گذرگاه محافظ گاز ایجاد شده تا از اکسیداسیون قسمت پشت جوش جلوگیری شود. تجهیزات جوشکاری لیزر مورد استفاده در آزمایش، یک لیزر HL3006D از نوع HAAS-LASER YAG بود که توسط TRUMPF (اشتوتگارت، آلمان) تولید شد. بالاترین توان خروجی پایدار ۳ kW، طول موج ۱۰۶۴ nm و قطر نقطه پس از کانونی‌سازی ۰.۶ mm بود. سیستم هدایت و فوکوس نور از یک قطبش دهنده مدور، یک منبسط کننده پرتو، الیاف نوری و یک لنز فوکوس تشکیل شده بود. در فرآیند جوشکاری، از بازوی مکانیکی ۶ محوره ساخته شده توسط KHI (کاوازاکی، ژاپن)

برای موقعیتیابی دقیق استفاده شد و حرکت نسبی پرتو لیزر و قطعه کار با استفاده از یک بستر عملیاتی محقق شد. بسیاری از تنظیمات پارامتر را در حین جوشکاری لیزر می‌توان تغییر داد، مانند قدرت جوشکاری، سرعت جوشکاری، زاویه جوشکاری، ورودی حرارت و جریان گاز بی اثر، اما در بیشتر موارد، تأثیر فردی بر تنش پسماند مشخص نبود. از آنجا که رابطه بین پارامترهای فرآیند در جوشکاری لیزر پیچیده است، در این مقاله فقط قدرت جوشکاری، سرعت جوشکاری و ورودی حرارت تغییر یافته است. این ماده یک صفحه آلیاژ تیتانیوم TC4 با استحکام تسلیم ۸۶۰ MPa، چگالی 4.5 g/cm^3 ، مدول الاستیک ۱۱۰ GPa و نسبت پواسون ۰.۳۴ بود. ترکیب شیمیایی اسمی آلیاژ در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیب TC4

ماده	Al	V	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
TC4	۵.۵-۶.۸	۲.۵-۴.۵	۰.۳	۰.۱۵	۰.۱	۰.۲	۰.۰۵	۰.۰۱۵	متعادل

در این آزمایش از جوشکاری لیزر پیوسته استفاده شده است. اندازه مقطع جوش $200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ و روش جوشکاری، جوشکاری لب به لب بود. آرگون به عنوان گاز محافظ مورد استفاده قرار گرفت. گاز محافظ از سه بخش تشکیل شده است: گاز محافظ هم محور برای محافظت از استخر ذوب، گاز محافظ جلو جهت محافظت از سطح جوش تازه جامد و گاز محافظ پشت برای محافظت از پشت جوش. با توجه به استفاده از انرژی لیزر، مقدار واکانونی^۸ به صفر رسیده است. دامنه قدرت جوشکاری و سرعت جوشکاری در حین اطمینان از کیفیت جوش محصولات تا حد امکان زیاد انتخاب شد. جدول ۲ ترکیبات مختلف سرعت جوشکاری و قدرت جوشکاری مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد. ورودی حرارت به عنوان قدرت جوشکاری/سرعت جوشکاری تعریف می‌شود. ورودی حرارت بیانگر انرژی لیزر جذب شده توسط جوش در طول واحد است و نقش مهمی در توزیع تنش پسماند جوشکاری دارد. براساس شناسایی فرآیند اولیه، پارامترهای اصلی انتخاب شده در این آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده، و ۹ نمونه آزمایشی برای بحث بیشتر در مورد تنش پسماند جوشکاری لیزر تهیه شده است.

^۸defocusing

جدول ۲. پارامترهای فرآیند جوشکاری لیزر.

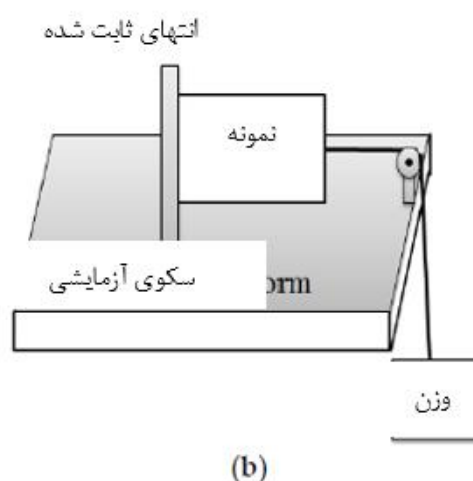
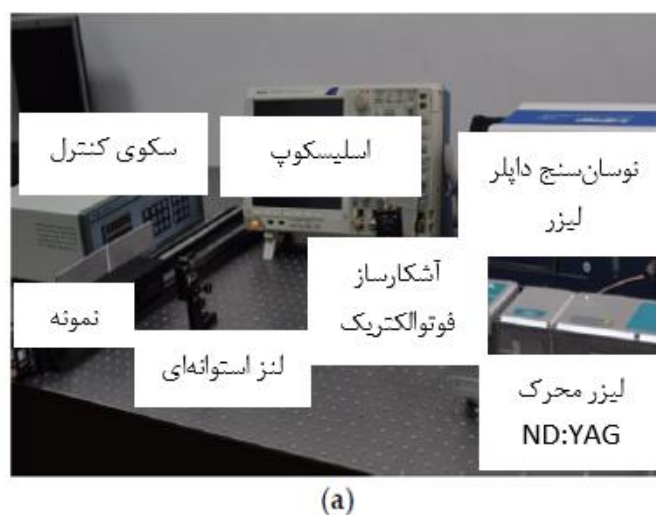
شماره جوش	قدرت جوشکاری (W)	سرعت جوشکاری (m/min)	ورودی حرارت (kJ/m)
1	2800	6.0	28
2	2800	4.8	35
3	2800	3.0	56
4	2000	4.0	30
5	2000	3.0	40
6	2000	2.0	60
7	1400	3.0	28
8	1400	2.4	35
9	1400	1.2	70

۲.۳. لیزر اولتراسونیک برای اندازه‌گیری تنش پسماند در جوشکاری لیزر

۱،۲،۳. دستگاه آزمایشی

کل سیستم آزمایش لیزر اولتراسونیک شامل سه بخش است: از لیزر Nd: YAG برای تولید امواج التراسونیک استفاده شده، از نوسان‌سنج داپلر لیزر برای تشخیص امواج اولتراسونیک استفاده شده، از یک مجموعه بارگذاری پیش تنش برای کالیبراسیون ضرایب آکوستوالاستیک استفاده شده است. کل سیستم در شکل ۱ ارائه شده است. یک پالس لیزر همراه با پروفیل Gaussian توسط مجموعه لیزر Nd: YAG ارسال شد (Dawa-100, Beamtech Optronics Ltd, پکن، چین)، این پرتو توسط لنزهای استوانه‌ای به عنوان منبع خطی با عرض ۰.۶ mm و طول ۲۰ mm برای تولید امواج سطحی متمرکز شد. پارامترهای اصلی لیزر تولید به شرح زیر است: طول موج $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ، عرض پالس $\tau = 8 \text{ ns}$ ، انرژی تک پالس $E_0 = 100 \text{ mJ}$ ، و حداکثر فرکانس تکرار $f = 20 \text{ Hz}$ که در ۲۰-۰ Hz قابل تنظیم بود. اطلاعات ارتعاش توسط یک نوسان‌سنج داپلر لیزر (Sdptop, Sunny Optical Technology Ltd, سوژو، چین) شناسایی شد، با طول موج لیزر He-Ne برابر ۶۳۲.۸ nm، باند فرکانس ۲.۵ MHz، فاصله کار ۲۰-۳۵ m، و وضوح جابجایی برابر ۰.۰۰۸ nm. نوسان‌سنج داپلر لیزر دارای توابع فوکوس خودکار/مسافت طولانی و توابع ذخیره‌سازی نقطه فوکوس بود. با چرخاندن لنز نوسان‌سنج می‌توان لیزر He-Ne را به صورت دستی تنظیم کرد. لیزر تشخیص در یک نقطه نور با قطر ۰.۷ mm

متمرکز شد. تعداد کمی از پرتوهای لیزر توسط آشکارگر فوتوالکتریک (Thorlabs Det10A / M، شرکت Thorlabs، نیوتن، نیویورک، ایالات متحده) با طول موج $1100\text{--}200\text{ nm}$ دریافت می‌شود. این کار همگام‌سازی کامل اسیلوسکوپ با عکس‌های لیزر را بدست می‌آورد. یک اسیلوسکوپ (Tektronix Inc. Dpo4102، USA, OR, Beaverton) با نرخ نمونه‌برداری 5 GS/s و باند فرکانس 1 GHz ، برای ذخیره سیگنال الکتریکی خروجی از آشکارساز فوتوالکتریک و نوسان‌سنج داپلر پس از 64 تکرار، به طور میانگین، به منظور کاهش نویز تصادفی استفاده شد. کامپیوتر داده‌های حاصل از آشکارساز فوتوالکتریک و اسیلوسکوپ را تجزیه و تحلیل و پردازش کرد. در آزمایش اندازه‌گیری، دو روش برای جلوگیری از تعامل بین حالت‌های مختلف سیگنال‌های اولتراسونیک استفاده شد. اول، مکان تشخیص سیگنال به دور از مکان تحریک بود. از آنجا که سرعت انتشار امواج مختلف در محیط‌ها متفاوت است، مسافت کافی می‌تواند امواج اولتراسونیک مختلف را برای شناسایی بهتر امواج عرضی و طولی جدا کند. علاوه بر این، نوسان‌سنج داپلر لیزر دارای دو گزینه کاربردی با فیلتر کم گذار (OUTPUT LP FILTER: 500 Hz ، 5 KHz ، 20 KHz و 100 KHz) و یک فیلتر گذار بالا (OUTPUT HP FILTER: DC یعنی جریان مستقیم است، بلوک DC، 60 Hz ، 1 KHz) بود. از تابع فیلتر گذار بالا استفاده شد، زیرا سیگنال‌های تداخل غیرضروری را در فرکانس پایین حذف می‌کند.

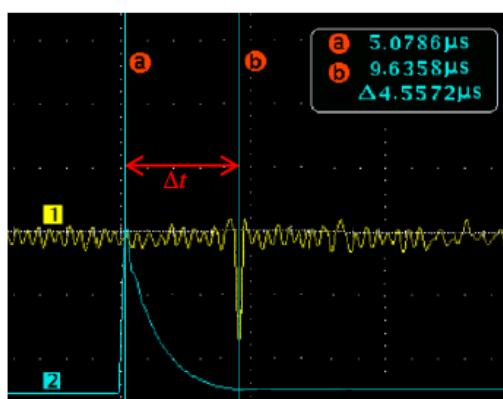


شکل ۱. سیستم آزمایشی: (a) لیزر اولتراسونیک و (b) دستگاه بارگذاری پیش تنش

۲.۲.۳. تعیین ضرایب آکوستوالاستیک

برای اندازه‌گیری تنش پسماند با لیزر اولتراسونیک، ابتدا آزمایش کالیبراسیون را انجام دادیم و ضرایب

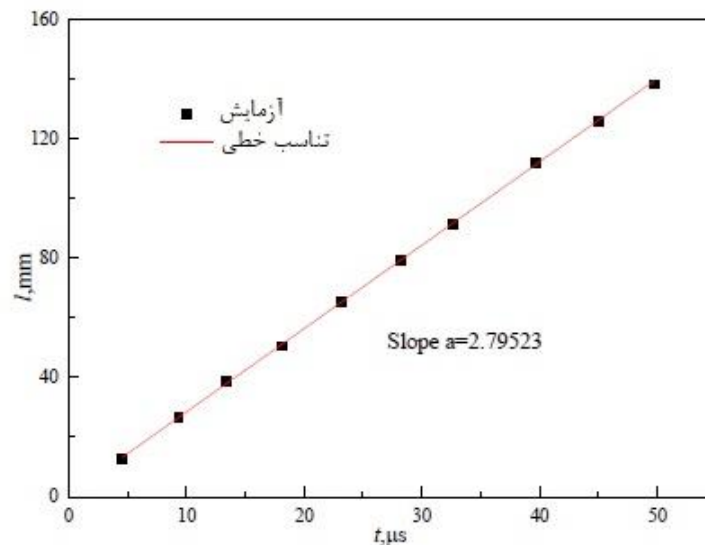
آکوستوالاستیک مواد را بدست آوردیم. ضرایب آکوستوالاستیک از طریق بارگذاری پیش تنش آنلین بدست آمد. انتهای نمونه مواد پایه TC4 بر روی سکوی نوری با پیچ و مهره‌ها ثابت شد (Thorlabs Nexus, Thorlabs USA, NJ, Newton, Inc.). محدودیت‌ها به عنوان شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته شدند. انتهای دیگر نمونه با وزنه با استفاده از کابل متصل شده و با تغییر وزنه، تنش‌های مختلف کششی حاصل می‌شود. بر اساس اصل سنت ونت، میدان تنش کششی با توزیع یکنواخت به دور از منطقه بارگذاری بدست آمده است. در مرحله اول، سرعت موج سطحی v_0 در نمونه ماده پایه و بدون بارگذاری اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های تحت تنش کششی یکنواخت اندازه‌گیری شدند. نکته قابل توجه این است که تنش بارگذاری باید کمتر از استحکام تسلیم ماده اصلی TC4 باشد، تا از تغییر شکل پلاستیک جلوگیری شود. سرعت، v_x و v_y ، به ترتیب موازی و عمود بر جهت تنش اصلی تعیین شد. در دو مورد، سرعت با استفاده از همان برنامه آزمایشی اندازه‌گیری شد. سرعت موج اولتراسونیک با زمان و مسافت طی شده تعیین شد. زمان حرکت Δt با یک اسیلوسکوپ ثبت شد و نتایج در شکل ۲ ارائه شده است. فاصله Δl بین محل تحریک و محل تشخیص با یک کولیس ورنیه اندازه‌گیری شد.



شکل ۲. زمان حرکت امواج سطحی در مواد پایه بدون تنش. تغییر در مسافت برابر $\Delta l = 12.82 \text{ mm}$ است، کانال ۱ سیگنال ارتعاش است، کانال ۲ سیگنال مرجع زمان است، a و b نشانگرهایی برای خواندن زمان حرکت هستند.

در این آزمایش از دو کانال اسیلوسکوپ استفاده شد. منحنی زرد، سیگنال ارتعاش اولتراسونیک را از نوسان‌سنج داپلر لیزر ثبت می‌کند. سیگنال موج سطحی آشکار بود، که مشخصه‌های موج سطحی را برآورده می‌کند. منحنی آبی سیگنال مرجع همزمان را از آشکارساز فوتوالکتریک ثبت کرد. زمان حرکت Δt بین محل تحریک و محل تشخیص توسط نشانگر تعیین شد. اندازه‌گیری خطای زمان و مسافت انتشار موج اولتراسونیک با استفاده از آزمایش

اتصالات خطی رفع شد. شیب منحنی اتصالات خطی v_0 است، جایی که $v_0 = 27.95.2 \text{ m/s}$ سرعت موج سطحی، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. منحنی اتصالات خطی حاصل از نتایج تجربی، شیب سرعت انتشار موج سطحی در ماده پایه TC4 را نشان می‌دهد.

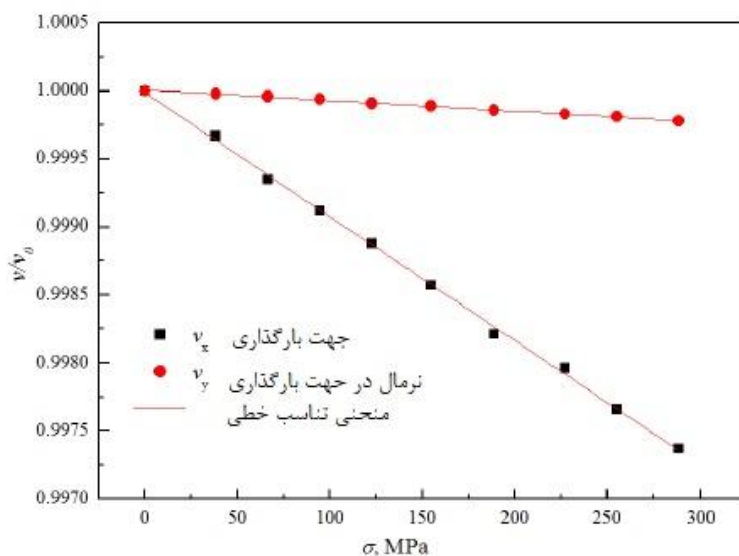
لیزر پالسی که روی سطح یک ماده عمل کرده، امواج طولی اولتراسونیک، امواج برشی و امواج سطحی را تولید می‌کند. سرعت‌های انتشار این امواج به چگالی و ثابت‌های الاستیک ماده مربوط است [33]. مطابق با نظریه مکانیک جامد [34]، معادلات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (5)$$

$$C_R = \frac{0.87 + 1.13\mu}{1 + \mu} C_S \quad (6)$$

در اینجا C_S و C_R به ترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج سطحی هستند؛ $E = 110 \text{ GPa}$ مدول الاستیک؛ $\mu = 0.34$ نسبت پواسون؛ و $\rho = 4.5 \text{ g/cm}^3$ چگالی TC4 است. راه‌حل تئوری سرعت موج‌های سطحی v_0' 2826.4 m/s را می‌توان با استفاده از معادلات (۵) و (۶) بدست آورد. خطای نتایج نظری و تجربی ۱،۱٪ بود. سپس میدان‌های مختلف تنش از طریق بارگذاری پیش تنش بر روی نمونه اعمال شد. در هر مرحله بارگذاری کششی تک محوره، سرعت انتشار موج سطحی، به صورت عمودی و موازی با جهت بارگذاری، اندازه‌گیری شد. با بارگذاری مرحله به مرحله نمونه TC4، رابطه بین نسبت سرعت موج سطحی و تنش کششی توسط منحنی‌ها

نشان داده می‌شود. شیب‌ها همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، ضریب ماده TC4 را نشان می‌دهند. برای امواج سطحی در ماده TC4، ما $A_x = -9.108 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ و $A_y = -7.789 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ را تعیین کردیم. برای بیشتر مواد بررسی شده، $A_x \gg A_y$ نتیجه‌گیری روشنی بود که توسط Ya و همکاران گزارش شده است [35]. پس از تعیین ضرایب آکوستوالاستیک از طریق بارگذاری پیش تنش آنلین، تنش پسماند با استفاده از معادلات (۱) و (۲) ارزیابی شد.

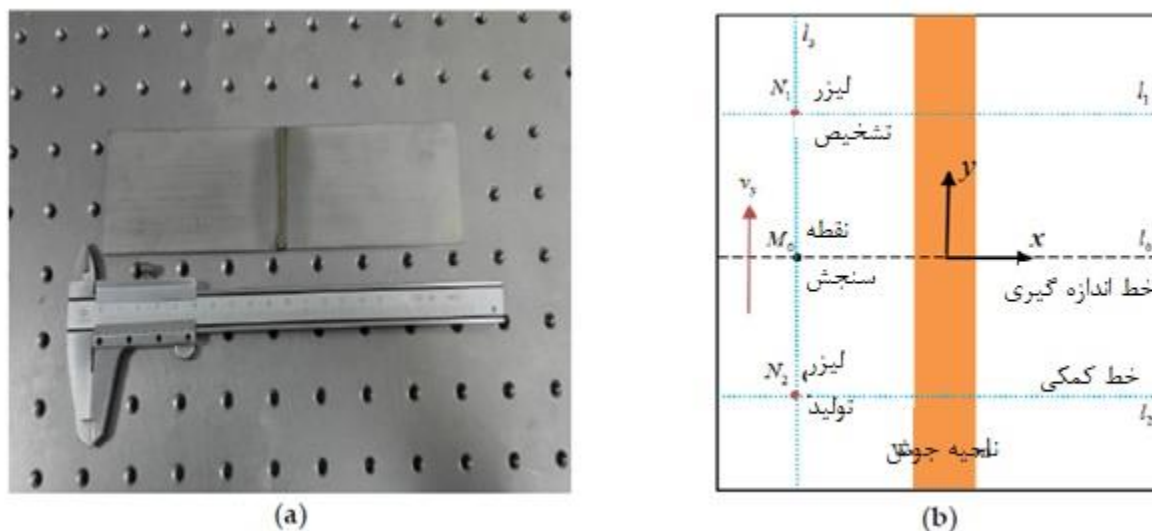


شکل ۴. رابطه بین نسبت سرعت و تنش کششی. شیب‌های منحنی اتصالات خطی با ضرایب آکوستوالاستیک مطابقت دارد.

۳.۲.۳. اندازه‌گیری تنش پسماند

تنش پسماند در حین جوشکاری لیزر آلیاژ تیتانیوم TC4 با استفاده از فناوری لیزر اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. برنامه آزمایشی و محل خطوط اندازه‌گیری در شکل ۵ نشان داده شده است، جایی که M_0 نقطه اندازه‌گیری است و تمام نقاط اندازه‌گیری در خط اندازه‌گیری مرتب شده‌اند؛ N_1 و N_2 به ترتیب موقعیت لیزر تحریک و لیزر تشخیص هستند؛ l_0 خط اندازه‌گیری (خط سیاه) است که در محور مرکزی نمونه تنظیم شده؛ و l_1 ، l_2 و l_3 خط‌های کمکی (خط آبی) هستند. نکته قابل توجه این است که تنش در نقطه اندازه‌گیری در واقع متوسط تنش پسماند در فاصله حرکت موج سطحی است. بنابراین، هنگامی که گرادیان تنش یا غلظت تنش زیادی وجود دارد، فاصله بین نقاط اندازه‌گیری باید اصلاح شود تا دقت اندازه‌گیری بهبود یابد. سرعت انتشار عرضی v_x با استفاده از همان برنامه آزمایشی بدست آمد و تنش پسماند نقطه اندازه‌گیری M_0 با استفاده از معادلات (۱) و (۲) تعیین

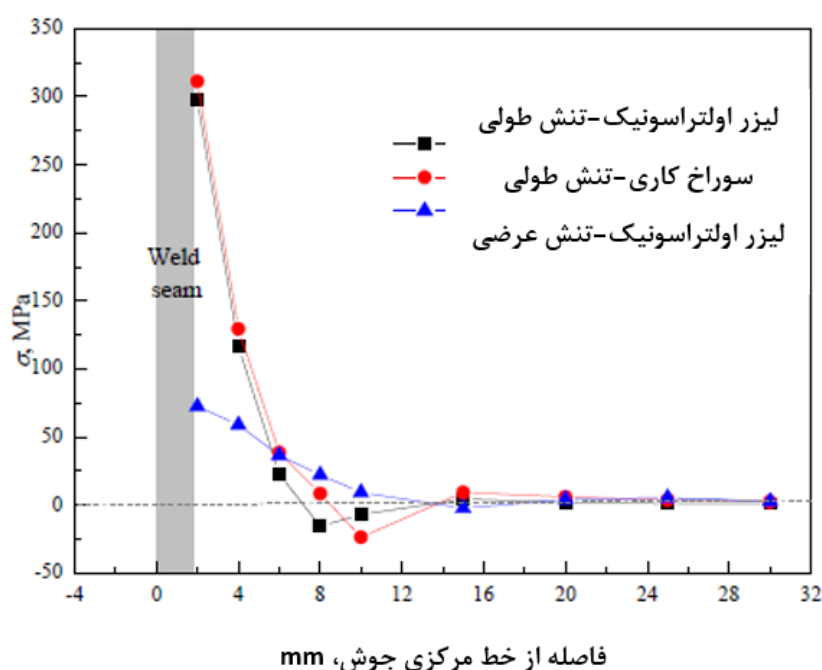
شد.



شکل ۵. (a) نمونه آزمایشی و (b) ترتیب خط اندازه گیری در هنگام اندازه گیری سرعت v_y ، جایی که M_0 نقطه اندازه گیری است؛ l_0 خط اندازه گیری؛ l_1, l_2 و l_3 خطوط کمکی هستند؛ و N_1 و N_2 موقعیت های پرتو لیزر هستند.

شکل ۶ توزیع تنش پسماند جوش ۱ با قدرت جوشکاری ۲۸۰۰ W، سرعت جوشکاری ۶،۰ m/min و ورودی حرارت ۲۸ kJ/m را نشان می دهد. از آنجا که شرایط مرزی در هر دو انتهای خط مرکزی جوش مشابه بود، یک رویکرد متقارن در پروفیل تنش پسماند فرض شد. منطقی بود که فرض کنیم نقاط داده در همان فاصله قرار داشته، اما در هر دو طرف خط مرکزی همان مقدار تنش پسماند را دارند. این نوع رویکردهای متقارن در تعدادی از مطالعات تحقیقاتی در مورد جوش ها به تصویب رسید [3,4]. تنش پسماند طولی بیشتر از تنش پسماند عرضی بود. تنش پسماند طولی، تنش کششی زیاد در نزدیکی درز جوشکاری بود، و حداکثر مقادیر تنش پسماند طولی و عرضی به ترتیب ۲۹۷،۷ MPa و ۷۲،۴ MPa در نزدیکی HAZ بود. تنش طولی با افزایش فاصله از خط مرکزی جوش به سرعت کاهش می یابد، از محل شروع در فاصله نزدیک به خط مرکزی جوش عبور کرده و منجر به متعادل سازی تنش فشاری به طور تقریبی برابر ۱۵۷ MPa- در میدان دور می شود. تنش پسماند جوش به یک سوم از استحکام تسلیم ماده رسید. اگر تنش پسماند در معرض نیروهای خارجی قرار داشته باشد، به راحتی از

استحکام تسلیم فراتر رفته و منجر به تغییر شکل پلاستیک و شکست اجزا می‌شود. تنش‌های پسماند طولی اندازه‌گیری شده با روش سوراخ کاری و روش لیزر اولتراسونیک اساساً یکسان بودند. با این حال، خطا و عدم اطمینان در اندازه‌گیری اجتناب‌ناپذیر است. برای تکنیک سوراخ کاری، عدم قطعیت تنش عمدتاً به مقدار مطلق کرنش بستگی دارد. برای تکنیک لیزر اولتراسونیک، عدم قطعیت عمدتاً به سرعت انتشار امواج اولتراسونیک بستگی دارد. با توجه به حداکثر تنش پسماند طولی، مربوط به تکنیک‌های لیزر اولتراسونیک و سوراخ کاری، عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها به ترتیب 1.2 MPa و 2.4 MPa بود.



شکل ۶. توزیع تنش پسماند در جوشکاری لیزر TC4 با قدرت جوشکاری 2800 W ، سرعت جوشکاری 6.0 m/min و ورودی حرارت 28 kJ/m . تنش‌های پسماند طولی اندازه‌گیری شده توسط روش سوراخ کاری و روش لیزر اولتراسونیک ثابت بودند.

۳.۳. سوراخ کاری برای اندازه‌گیری تنش پسماند

مکانیسم تکامل تنش پسماند جوشکاری و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن پیچیده است. تحلیل نظری به تنهایی نمی‌تواند مشکل را حل کند. بنابراین، یک آزمایش مخرب با استفاده از روش سوراخ کاری برای اعتبار صحت روش لیزر اولتراسونیک استفاده شده است. در این آزمایش از یک دستگاه حفاری نوع ZDL و یک نوع گلوله کرنشی نوع TJ-120-1.5 استفاده شد. کرنش شعاعی ناشی از گمانه‌ها و تنش‌های طولی و عرضی اندازه‌گیری شده

براساس روابط زیر محاسبه شدند:

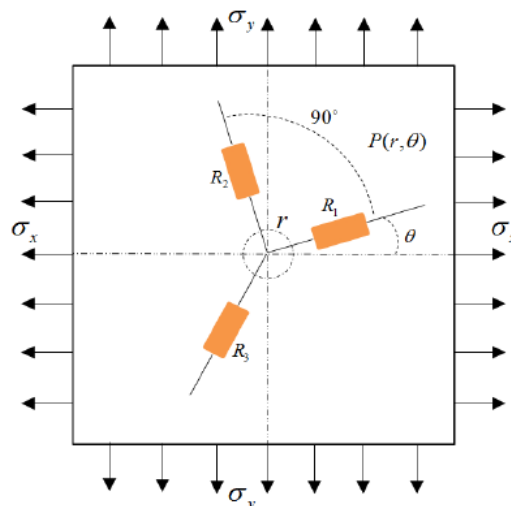
$$\sigma_{x,y} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} \pm \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + [2\varepsilon_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]^2} \quad (7)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_3 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (8)$$

جایی که ε_1 ، ε_2 و ε_3 کرنش‌های شعاعی اندازه‌گیری شده توسط گلوله کرنش هستند. گلوله کرنش از سه شبکه مختلف حساس به زاویه تشکیل شده است که در جهت شعاعی قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، θ زاویه بین تنش اصلی σ_x و کرنش‌سنج R_1 است. ضرایب آزادسازی A و B را می‌توان با فرمول‌های زیر بدست آورد [36]:

$$A = -\frac{1+\mu}{2E} \cdot \frac{a^2}{r^2} \cdot B = \frac{1}{2E} \left[3(1+\mu) \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right] \quad (9)$$

در اینجا a شعاع حفره، r فاصله بین مرکز حفره و نقطه میانی شبکه‌های حساس، و E و μ به ترتیب مدول الاستیک و نسبت پواسون هستند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، تنش‌های پسماند طولی اندازه‌گیری شده با روش سوراخ کاری و روش لیزر اولتراسونیک ثابت بودند. در منطقه با تنش بالا، روش سوراخ کاری به دلیل تمرکز تنش ناشی از سوراخ، اثر بزرگتری نسبت به لیزر اولتراسونیک به وجود آورد.



شکل ۷. نمودار آرایش شبکه حساس که در آن θ زاویه بین تنش اصلی σ_x و کرنش‌سنج R_1 است، و زاویه بین

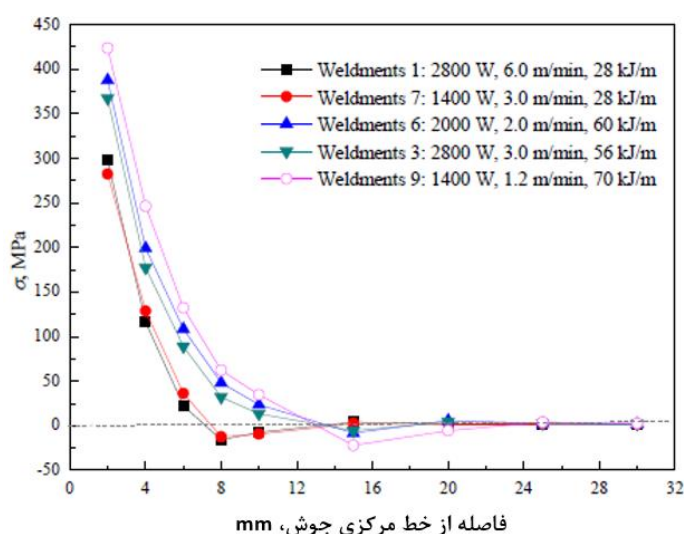
کرنش‌سنج R_2 و R_3 برابر ۱۳۵ درجه می‌باشد.

۴. نتایج و بحث

در هنگام کارکردن اجزای جوشکاری، انطباق بار خارجی و تنش پسماند داخلی منجر به توزیع مجدد تنش پسماند جوشکاری می‌شود، که این امر به طور جدی بر خواص مکانیکی اجزای جوش داده شده خصوصاً از نظر استحکام خستگی، شکست ترد و ترک خوردگی تنشی^۹ اثر می‌گذارد. بنابراین، لازم است تا اثر پارامترهای جوشکاری لیزر بر تنش پسماند بررسی شود.

۱.۴. اثرات ورودی حرارت بر تنش پسماند

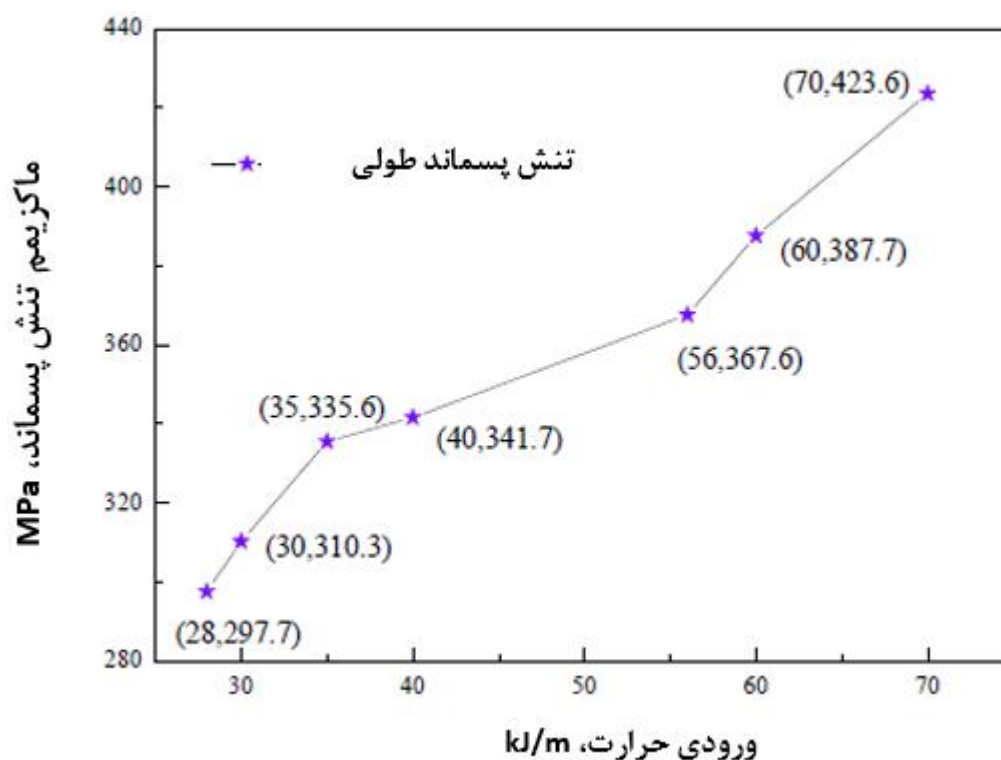
در شکل ۸ اندازه‌گیری‌های تنش پسماند طولی برای یک سری از جوشکاری لیزر، با افزایش ورودی حرارت گروه-بندی شده است. ورودی حرارت به طور قابل توجهی تحت تأثیر تنش پسماند قرار دارد. برای جوش‌های ۱ و ۷ با همان ورودی حرارت برابر ۲۸ kJ/m، تغییر کمی در توزیع و حداکثر مقدار تنش پسماند وجود داشت. اختلاف حداکثر تنش کششی کمتر از ۱۵ MPa بود. برای جوش‌های با ورودی‌های حرارتی مختلف، حداکثر مقدار تنش پسماند با افزایش ورودی حرارت افزایش یافت. عرض ناحیه تنش پسماند طولی کششی در نیمه صفحه ۷ mm با ورودی حرارت ۲۸ kJ/m و ۱۳ mm با ورودی حرارت ۶۰ kJ/m است، به این معنی که گرادیان تنش در ناحیه ذوب جوشکاری نفوذی لیزر کامل، شیب‌دار بود. با افزایش ورودی حرارت، انرژی جذب شده در طول واحد افزایش یافته است که باعث تغییر شکل پلاستیک در ناحیه دما بالا شده و منطقه تغییر شکل پلاستیک مربوطه به بیرون منتقل می‌شود. بنابراین، منطقه تنش پسماند کششی افزایش یافته است.



^۹stress corrosion cracking

شکل ۸. توزیع تنش پسماند طولی با ورودی‌های حرارتی مختلف.

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش ورودی حرارت، حداکثر تنش پسماند طولی به تدریج افزایش می‌یابد. کل فرآیند تغییر را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد. در طول مرحله اول (ورودی حرارت kJ/m ۲۸-۳۵) و مرحله سوم (ورودی حرارت kJ/m ۵۶-۷۰)، تنش پسماند ماکزیمم به طور قابل توجهی تغییر کرد، که عمدتاً ناشی از گرادیان دمایی بزرگ در ورودی حرارت بالا و منطقه تغییر شکل پلاستیک کوچک در ورودی حرارت کم بود. هنگامی که ورودی حرارت از kJ/m ۳۵ تا kJ/m ۵۶ تغییر کرد، تنش پسماند طولی ماکزیمم به آهستگی تغییر کرد. نتیجه‌گیری از این داده‌ها به این صورت است که مرحله ثانویه ممکن است طیف ورودی حرارت ترجیحی برای جوشکاری لیزر صفحات آلیاژ تیتانیوم با ضخامت 2 mm باشد، هنگامی که تنش پسماند و دیگر عوامل اثرگذار بر کیفیت جوشکاری در نظر گرفته می‌شوند.

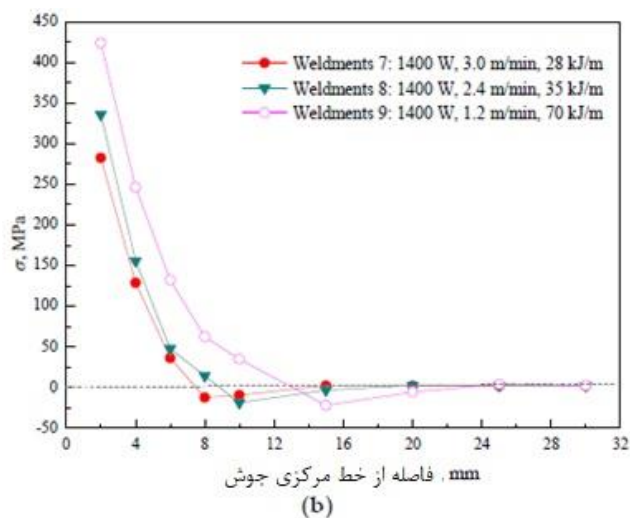
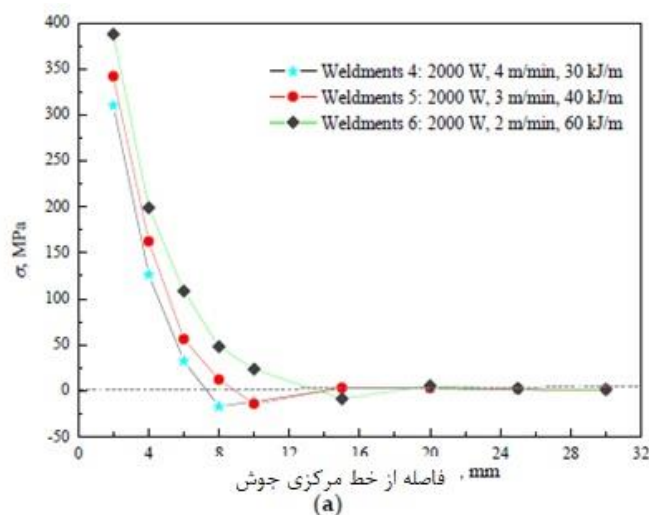


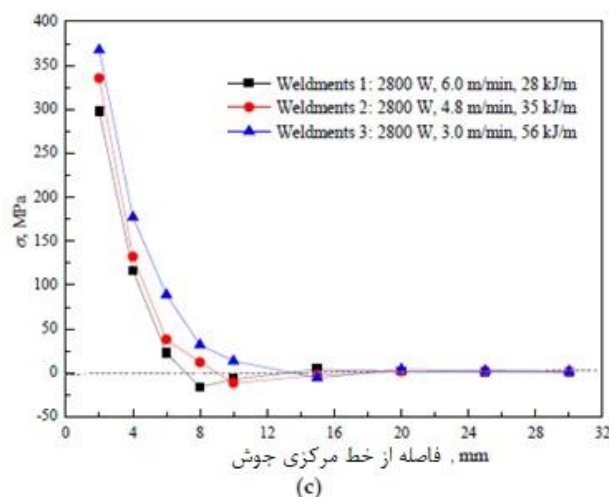
شکل ۹. رابطه بین حداکثر تنش پسماند طولی و ورودی حرارت. سه مرحله خطی تقریبی ارائه شده و حداکثر تنش پسماند به آرامی در مرحله دوم تغییر می‌کند.

۲.۴. اثرات سرعت جوشکاری بر تنش پسماند

به عنوان یک پارامتر مهم فرآیند جوشکاری لیزر، سرعت جوشکاری مستقیماً کارایی جوشکاری را تعیین می‌کند.

شکل ۱۰ اثر سرعت جوشکاری بر توزیع تنش پسماند را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جوشکاری، حداکثر تنش پسماند به دلیل کاهش انرژی جذب شده توسط جوش در طول واحد ناشی از تغییرات ورودی حرارت کاهش می‌یابد. با کاهش سرعت جوشکاری، ناحیه تنش کششی به دلیل افزایش ناحیه تغییر شکل پلاستیک ناشی از ورودی حرارت بالا افزایش می‌یابد. بنابراین، در صورت ثابت بودن قدرت جوشکاری، سرعت‌های بالاتر جوشکاری باید انتخاب شود تا راندمان جوشکاری بهبود یافته و تنش پسماند کاهش یابد.



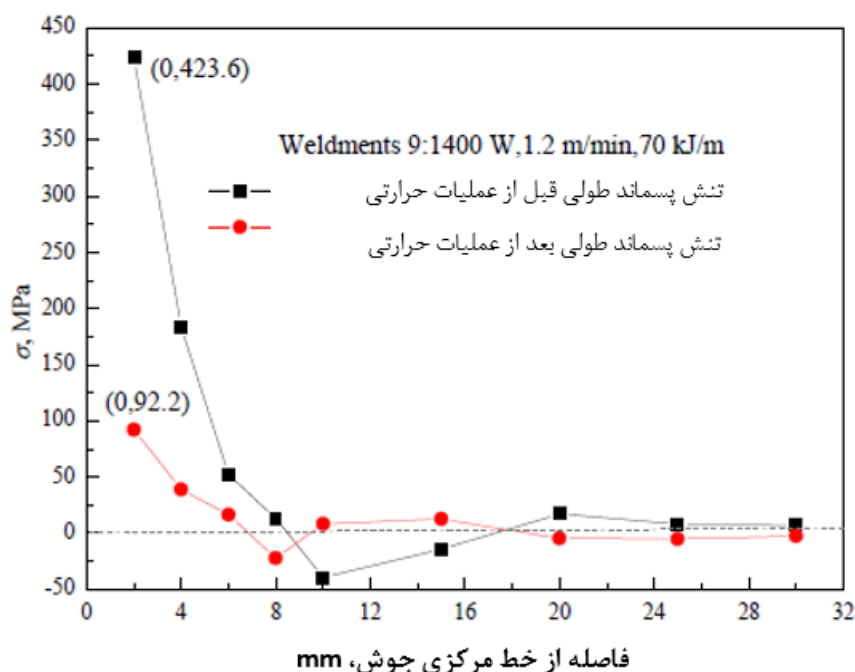


شکل ۱۰. توزیع تنش پسماند طولی با قدرت جوشکاری یکسان: (a) 2000 W، (b) 1400 W و (c) 2800 W.

۳.۴. اثرات عملیات حرارتی بر تنش پسماند

تنش پسماند تولید شده توسط جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیوم TC4 در نزدیکی خط جوش و ذوب در حدود ۵۰٪ استحکام تسلیم ماده پایه بود. بنابراین لازم است که جوشکاری لیزر و عملیات حرارتی پس از جوش را برای کنترل تنش پسماند بکار ببریم. به منظور جلوگیری از اکسیداسیون و آلودگی آلیاژ تیتانیوم در هوا، از کوره خلاء با دقت ± 5 درجه سانتیگراد برای عملیات حرارتی استفاده شد. نمونه با پیچ و مهره‌های بست به منظور حذف پیچ و تاب آن نگه داشته شد. به طور کلی، دمای گرمایش و زمان نگه داشتن، میزان تنش‌های پسماندی که طی عملیات حرارتی حذف می‌شوند را تعیین می‌کند. به طور تجربی، استاندارد بین المللی GJB3763A بکار رفت، دمای عملیات حرارتی 650°C ، و زمان نگه داشتن ۱۲۰ دقیقه بود. سپس، تنش پسماند در نمونه‌های جوشکاری لیزر پس از عملیات حرارتی با یک لیزر اولتراسونیک اندازه‌گیری شد.

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده تنش پسماند طولی به شدت کاهش یافته است. کاهش حداکثر تنش پسماند به ویژه مشهود بود. حداکثر تنش پسماند طولی از ۴۲۳ به ۹۲ مگاپاسکال کاهش یافته است، یک کاهش ۷۸ درصدی، اما تنش پسماند ماکزیمم پس از عملیات حرارتی هنوز بزرگتر بود. به دلیل توزیع مجدد تنش پسماند ناشی از عملیات حرارتی، تنش کششی جزئی و تنش فشاری در ناحیه جوش دور به یکدیگر تبدیل شدند. اگرچه عملیات حرارتی می‌تواند تنش پسماند را تا حد خاصی کاهش دهد، اما هنوز کنترل تنش پسماند با بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند جوشکاری ضروری است.



شکل ۱۱. مقایسه تنش پسماند طولی قبل و بعد از عملیات حرارتی. حداکثر تنش پسماند طولی از ۴۲۳ MPa به ۹۲ MPa کاهش یافته است، یک کاهش ۷۸ درصدی.

۵. نتیجه گیری

از روش لیزر اولتراسونیک برای اندازه گیری تنش پسماند در جوشکاری لیزر آلیاژ تیتانیوم TC4 استفاده شد. روش بارگذاری پیش تنش ارائه شد و ضرایب آکوستوالاستیک آلیاژهای تیتانیوم TC4 در ابتدا بدست آمدند. براساس شناخت از ضرایب آکوستوالاستیک، تنش های پسماند جوشکاری طولی و عرضی با تکنیک لیزر اولتراسونیک اندازه گیری شدند. نتایج نشان داد که تنش پسماند طولی به طور آشکاری بزرگتر از تنش عرضی بود. تنش پسماند طولی، تنش کششی بالا در نزدیکی درز جوشکاری بوده و مقدار ماکزیم تنش پسماند طولی حدود ۴۲۰ MPa، که نصف استحکام تسلیم بود. سپس اثر پارامترهای فرآیند بر خصوصیات تنش پسماند بحث شد. نتایج نشان داد که حرارت ورودی، پارامتر غالب در تعیین تنش پسماند جوشکاری لیزر است. با افزایش حرارت ورودی، منطقه جوش گسترده تر شده و مقدار پیک تنش پسماند به تدریج افزایش می یابد. سرعت های جوشکاری بالاتر باید تا حد امکان زیاد انتخاب شود هنگامی که قدرت جوشکاری ثابت است. عملیات حرارتی می تواند حداکثر تنش پسماند طولی را حدود ۸۰٪ کاهش داده و منجر به توزیع مجدد تنش شود.

مشارکت‌های نویسندگان: کار ارائه شده در اینجا با همکاری همه نویسندگان انجام شد. Y.Z. مقاله را طراحی، تجزیه و تحلیل کرده و C.L. آن را نوشت. E.Z. متن کامل را راهنمایی کرد و Y.G. داده‌های تجربی را تهیه و تجزیه و تحلیل کرد. همه نویسندگان در تهیه نسخه خطی مشارکت و آن را تأیید کردند.

حمایت مالی: این تحقیق توسط بنیاد ملی علوم طبیعی پروژه چین (Grant No. 51771051)، بنیاد تحقیقات دکتری پروژه استان لیائونینگ (گرات شماره ۲۰۱۷۰۵۲۰۴۳۹) و صندوق‌های تحقیقاتی بنیادی دانشگاه‌های مرکزی پشتیبانی می‌شود (گرات شماره N170504021).

تشکرها: نویسندگان می‌خواهند از مهندس ارشد لی از موسسه AVIC 601 برای تهیه نمونه‌های جوشکاری و پارامترهای فرآیند مرتبط قدردانی کنند. علاوه بر این، نویسندگان می‌خواهند از مهندس شان از شرکت صنعتی هواپیمای Shenyang به خاطر کمک به ما در تکمیل آزمایش عملیات حرارتی پس از جوشکاری تشکر کنند.

تضاد منافع: نویسندگان هیچ تضاد منفی را اعلام نمی‌کنند.

References

1. Ancona, A.; Sibillano, T.; Lugara, P.M.; Gonnella, G.; Pascazio, G. An analysis of the shielding gas flow from a coaxial conical nozzle during high power CO₂ laser welding. *J. Phys. D Appl. Phys.* **2006**, *39*, 563–574. [CrossRef]
2. Akman, E.; Demir, A.; Canel, T.; Sinmazç, T. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys. *J. Mater. Process. Technol.* **2009**, *209*, 3705–3713. [CrossRef]
3. Gao, X.L.; Zhang, L.J.; Liu, J.; Zhang, J.X. A comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding and TIG welding of thin Ti6Al4V titanium alloy plate. *Mater. Sci. Eng. A* **2013**, *559*, 14–21. [CrossRef]
4. Kashaev, N.; Ventzke, V.; Fomichev, V.; Fomin, F.; Riekehr, S. Effect of Nd:YAG laser beam welding on weld morphology and mechanical properties of Ti–6Al–4V butt joints and T-joints. *Opt. Lasers Eng.* **2016**, *86*, 172–180. [CrossRef]
5. Lim, C.; Nin, J.; Guilemany, J.M. Evaluation of residual stresses of thermal barrier coatings with HVOF thermally sprayed bond coats using the modified layer removal method. *Surf. Coat. Technol.* **2006**, *200*, 5963–5972. [CrossRef]
6. Baldi, A. Residual stress measurement using hole drilling and integrated digital image correlation techniques. *Exp. Mech.* **2014**, *54*, 379–391. [CrossRef]
7. Koester, L.W.; Taheri, H.; Bigelow, T.A.; Collins, P.C.; Bond, L.J. Nondestructive testing for metal parts fabricated using powder-based additive manufacturing. *Mater. Eval.* **2018**, *76*, 514–524.
8. Dixon, S.; Burrows, S.E.; Dutton, B.; Fan, Y. Detection of cracks in metal sheets using pulsed laser generated ultrasound and EMAT detection. *Ultrasonics* **2011**, *51*, 7–16. [CrossRef] [PubMed]
9. Lowe, M.J.S.; Alleyne, D.N.; Cawley, P. Defect detection in pipes using guided waves. *Ultrasonics* **1998**, *36*, 147–154. [CrossRef]
10. Duquennoy, M.; Ouaflouh, M.; Qian, M.L.; Jenot, F.; Ourak, M. Ultrasonic characterization of residual stresses in steel rods using a laser line source and piezoelectric transducers. *NDT&E Int.* **2001**, *34*, 355–362.
11. Ruiz, A.M.; Nagy, P.B. Diffraction correction for precision surface acoustic wave velocity measurements. *J. Acoust. Soc. Am.* **2002**, *112*, 835–842. [CrossRef] [PubMed]
12. Bescond, C.; Monchalain, J.P.; Gilbert, A.; Talbot, R.; Ochiai, M. Determination of residual stresses using laser-generated surface skimming longitudinal waves. *Proc. SPIE* **2005**, *5767*, 175–186.
13. Doxbeck, M.; Hussain, M.A.; Frankel, J. Use of laser generated creeping longitudinal waves to determine residual stresses. *IEEE Ultrason. Symp.* **2000**, *73*, 725–728.

14. Moreau, A.; Man, C.S. Laser-ultrasonic measurements of residual stresses in a 7075-T651 aluminum sample surface-treated with low plasticity burnishing. *Proc. SPIE* **2006**, *820*, 1434.
15. Dong, L.M.; Li, J.; Ni, C.Y.; Shen, Z.H.; Ni, X.W. Evaluation of residual stresses using laser-generated SAWs on surface of laser-welding plates. *Int. J. Thermophys.* **2013**, *34*, 1066–1079. [[CrossRef](#)]
16. Karabutov, A.; Devichensky, A.; Ivochkin, A. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress. *Ultrasonics* **2008**, *48*, 631–635. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Sanderson, R.M.; Shen, Y.C. Measurement of residual stress using laser-generated ultrasound. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* **2010**, *87*, 762–765. [[CrossRef](#)]
18. Fernandes, F.A.O.; Oliveira, D.F.; Pereira, A.B. Optimal parameters for laser welding of advanced high-strength steels used in the automotive industry. *Procedia Manuf.* **2017**, *13*, 219–226. [[CrossRef](#)]
19. Xue, X.; Pereira, A.B.; Amorim, J.; Liao, J. Effects of pulsed Nd:YAG laser welding parameters on penetration and microstructure characterization of a DP1000 steel butt joint. *Metals* **2017**, *7*, 292. [[CrossRef](#)]
20. Li, S.; Xu, W.; Su, F.; Deng, H.; Deng, Z. Influence of CO₂ shielding gas on high power fiber laser welding performance. *Metals* **2018**, *8*, 449. [[CrossRef](#)]
21. Popescu, A.C.; Delval, C.; Leparoux, M. Control of porosity and spatter in laser welding of thick AlMg5 parts using high-speed imaging and optical microscopy. *Metals* **2017**, *11*, 452. [[CrossRef](#)]
22. Lee, H.K.; Han, H.S.; Son, K.J.; Hong, S.B. Optimization of Nd:YAG laser welding parameters for sealing small titanium tube ends. *Mater. Sci. Eng. A* **2006**, *415*, 149–155. [[CrossRef](#)]
23. Crecraft, D.L. The measurement of applied and residual stress in metals using ultrasonic waves. *J. Sound Vib.* **1967**, *5*, 173–192. [[CrossRef](#)]
24. Truell, R.; Chick, B.; Elbaum, C. *Ultrasonic Methods in Solid State Physics*; Academic Press: New York, NY, USA, 1969.
25. Egle, D.M.; Bray, D.E. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constant for rail steel. *J. Acoust. Soc. Am.* **1979**, *37*, 41–55.
26. Jassby, K.M.; Aharoni, A.; Cohen, N. Determining surface residual stress in isotropic solids by combined ultrasonic velocity measurements. *Ultrasonics* **1985**, *23*, 79–85.
27. Duquennoy, M.; Ouafoutou, M.; Ourak, M. Determination of stresses in aluminum alloy using optical detection of Rayleigh waves. *Ultrasonics* **1999**, *37*, 365–372. [[CrossRef](#)]
28. Hirao, M.; Fukuoka, H.; Hori, K. Acoustoelastic effect of Rayleigh surface wave in isotropic material. *J. Appl. Mech.* **1981**, *48*, 119–124. [[CrossRef](#)]
29. Hayes, M.; Rivlin, R.S. Surface waves in deformed elastic materials. *Arch. Ration. Mech. Anal.* **1961**, *8*, 359–380. [[CrossRef](#)]
30. Pao, Y.H.; Sachse, W.; Fukuoka, H. *Acoustoelasticity and Ultrasonic Measurement of Residual Stress, in Physical Acoustics: Principles and Methods*; Academic Press: New York, NY, USA, 1984; pp. 61–143.
31. Husson, D. A perturbation theory for the acoustoelastic effect of surface waves. *J. Appl. Phys.* **1985**, *57*, 1562–1568. [[CrossRef](#)]
32. Dunstan, D.J.; Bosher, S.H.B.; Downes, J.R. Effective thermodynamic elastic constants under finite deformation. *Appl. Phys. Lett.* **2002**, *80*, 2672. [[CrossRef](#)]
33. Zhan, Y.; Liu, C.S.; Zhang, F.P.; Qiu, Z.G. Experimental study and finite element analysis based on equivalent load method for laser ultrasonic measurement of elastic constants. *Ultrasonics* **2016**, *69*, 243–247. [[CrossRef](#)]
34. Auld, B.A. *Acoustic Fields and Waves in Solids*; Wiley Interscience: New York, NY, USA, 1973; Volume 1.
35. Ya, M.; Marquette, P.; Belahcene, F.; Lu, J. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods. *Mater. Sci. Eng. A* **2004**, *382*, 257–264. [[CrossRef](#)]
36. Dai, F.L.; Shen, G.L.; Xie, H.M. *Experimental Mechanics*; Tsinghua University Press: Beijing, China, 2010.