

ارزیابی غیرمخرب کیفیت اتصالات چسبی در ورق‌ها به کمک امواج ورقی

فرهنگ هنرور (دانشیار)

سید محمدحسن روحانی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

در این نوشتار با بهره‌گیری از امواج ورقی^۱، که به آن‌ها امواج لمب^۲ نیز گفته می‌شود، به ارزیابی و تعیین کیفیت اتصالات چسبی می‌پردازیم. ابتدا معادلات لازم برای یافتن منحنی‌های پراکندگی ارائه و سپس با استفاده از این منحنی‌ها مدهای مناسب برای انجام بازرسی انتخاب می‌شود. مناسب‌ترین مد برای انجام بازرسی اولین مد متقارن امواج ورقی، یعنی S_0 است. سپس نمونه‌هایی از اتصالات چسبی سالم و معیوب با استفاده از ورق‌های آلومینیوم ساخته و با استفاده از دو پروب فراصوتی زاویه متغیر، که به عنوان فرستنده و گیرنده عمل می‌کنند، کیفیت این اتصالات مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصله حاکی از آن است که امواج ورقی به‌خوبی قادرند عیوب موجود در اتصالات چسبی را تشخیص داده و اندازه آن‌ها را معین کنند.

واژگان کلیدی: ارزیابی غیرمخرب، اتصالات چسبی، امواج لمب، امواج ورقی، منحنی پاشش، مد S_0 .

مقدمه

امکان‌پذیر نبود. میندلین (۱۹۶۰) از اولین کسانی بود که توانست این معالات را حل کند.^[۲] در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ و اوایل ۱۹۹۰ تحقیقات بر روی استفاده از امواج ورقی در مواد کامپوزیتی آغاز شد. در مؤسسه‌ی ناسا (NASA) تحقیقاتی برای تشخیص جدایش لایه‌ها در کامپوزیت‌ها انجام شد.^[۳،۴] فعالیت مشابهی نیز در گروه تحقیقات سنجش و پدافند^۳ انجام گرفت.^[۵] به نظر می‌رسد موفق‌ترین مطالعه تاکنون برای استفاده از امواج ورقی در تشخیص عیوب، توسط دو گروه مجزا در امپریال کالج لندن انجام شده است. در نیمه‌ی اول دهه‌ی ۱۹۹۰ گروه کاولی^۴ بر روی بهینه‌سازی تولید امواج ورقی هدایت‌شده با استفاده از مواد پیزوالکتریک پلیمری، موسوم به PVDF، کار کرده‌اند.^[۶،۷] گروه دوم، هوانوردانی بودند که بر روی موضوعاتی مثل چیدمان حس‌گرها و پردازش سیگنال کار می‌کردند.^[۸] در سال ۱۹۹۹ برای آزمون جوش با امواج لمب، از فرستنده‌ی لیزر و گیرنده‌ی آکوستیکی الکترومغناطیسی^۵ استفاده شد.^[۹] در سال ۲۰۰۰ نیز با استفاده از پروب تماسی و به کمک سیستم تولید تک‌فرکانس^۶، مدهای A_0 و S_0 به‌طور مجزا و بدون تداخل تولید شدند و عیوب مصنوعی در ورق فولادی به ضخامت ۲٫۴ میلی‌متر تشخیص داده شد.^[۱۰] در سال ۱۹۹۹ محققین در دانشگاه شیزوکا^۷ ی ژاپن تلاش کردند تا با لیزر فراصوتی موج لمب تولید کرده و ضخامت ورق فولاد ضدزنگ و خواص کشسان آن را به دست آورند.^[۱۱] در سال ۲۰۰۲ نیز کاری مشابه این تحقیق بر روی مس انجام شد.^[۱۲] پس از آن در سال ۲۰۰۳، محققین دانشگاه شیزوکا کوشیدند تا با تولید یک مد خاص موج لمب، به‌شیوه‌ی مناسب عیب را تشخیص دهند.^[۱۳] آنان برای تولید و ارسال موج از پروب تماسی، و برای دریافت موج از پروب غیرتماسی با ماده‌ی

رشد علم و پیشرفت فناوری باعث پیچیده‌شدن صنایع و سازه‌ها شده است. این پیچیدگی بر ارزش‌مندی آن‌ها از نقطه‌نظر کارایی و ارزش علمی افزوده است. از سوی دیگر، خرابی سازه‌ی افزون بر هزینه‌ی خود سازه با هزینه‌های جانبی دیگری نیز همراه است که گاه بسیار بیشتر و بااهمیت‌تر از هزینه‌ی مستقیم سازه است. متخصصان می‌کوشند تا حد ممکن از بروز چنین حوادثی جلوگیری کنند. یکی از راه‌های جلوگیری از این حوادث، کنترل مداوم سازه‌ها و آگاهی از وجود عیوب ریز – مثل ترک – و ممانعت از ایجاد آن پیش از شکست است. امواج فراصوتی ورقی (لمب) یکی از بهترین ابزارها برای ارزیابی غیرمخرب سازه‌های نازک (سازه‌های ورقی) هستند.

خصوصیت ویژه‌ی موج لمب، انتشار آن در سطح وسیع با میرایی کم است. امواج لمب مدهای متقارن (S) و نامتقارن (A) منتشر می‌شوند؛ هر یک از این مدها نیز حالات مختلفی دارند. خصوصیت دیگر امواج لمب وابستگی سرعت انتشار آن‌ها به فرکانس و ضخامت ورق است.

نخستین تحقیق در خصوص امواج ورقی، و استفاده از آن‌ها به‌عنوان ابزاری برای تشخیص عیب، در سال ۱۹۶۱ و از شرکت جنرال الکتریک بود.^[۱] این تحقیق بررسی تحلیلی منحنی پاشش آلومینیوم و زیرکونیوم را شامل می‌شد، و نیز به بحث درباره‌ی اهمیت مدهای مختلف امواج ورقی – به‌عنوان ابزار عیب‌یابی – می‌پرداخت. حل معادلات مشخصه‌ی امواج ورقی (لمب) تا زمان اختراع رایانه‌های دیجیتالی

واسط هوا استفاده کردند. در سال ۲۰۰۵ به کمک امواج لمب که با روش غوطه‌وری (غیرتماسی) تولید می‌شدند، عیوب اتصالات چسبی از نوع لبه‌های روی هم افتاده^۸ بررسی، و نتایج با نمونه‌های مدل‌سازی شده مقایسه شد.^[۱۴] این نتایج تحلیلی با آزمایشات تطابق خوبی نشان دادند. همچنین در این تحقیق تلاش شد تا ابعاد عیوب نیز تخمین زده شود. در سال ۲۰۰۶ با استفاده از مولدهای لیزری به عنوان یک روش غیرتماسی برای تولید موج لمب و تشخیص عیوب در ورق‌ها، تلاش شد تا با این روش یک موج تک‌فرکانس با تمرکز بالا تولید شود.^[۱۵]

در این نوشتار ابتدا از امواج لمب برای موقعیت‌یابی عیوب بر روی ورق‌های نازک آلومینیوم استفاده خواهد شد. در مراحل این تشخیص ابتدا مد مناسب برای انجام آزمایشات تعیین، و سپس چندین نمونه ورق مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در ادامه، به کمک امواج لمب به ارزیابی اتصالات چسبی در ورق‌های نازک خواهیم پرداخت. هدف از این ارزیابی تعیین کیفیت اتصالات چسبی و اندازه‌گیری عیوب در این اتصالات است.

نظریه

در صفحاتی که دو مرز آزاد دارند و در مقایسه با طول موج امواج فراصوتی نازک‌اند، مدهای مختلفی از امواج لمب یا امواج هدایت‌شونده -- شامل مدهای متقارن (S_i) و مدهای نامتقارن (A_i) -- ایجاد می‌شود. مد متقارن متناظر با انتشار موج به شکل انقباض و انبساط متقارن در دو سطح صفحه، و مدهای نامتقارن مربوط به انتشار موج به شکل خمشی هستند.^[۱۳، ۱۴] اندیس i ، که مقدار آن صفر یا عددی صحیح و مثبت است، مرتبه‌ی مد موج لمب را نشان می‌دهد.

در ورقی با ابعاد و جنس معین، حالت‌های مختلف موج که می‌تواند تولید شوند تابعی از ضخامت صفحه، فرکانس موج و سرعت موج در ورق هستند. سرعت امواج ورقی در ورق به حاصل ضرب ضخامت ورق در فرکانس وابسته است، در اصطلاح چنین امواجی را دیسپرسیو^۹ (متفرق‌کننده) می‌نامند. به عبارت دیگر، به دلیل دیسپرسیو بودن امواج ورقی سرعت انتشار این امواج نه تنها به مشخصات جنس محیط انتشار، که به ضخامت محیط انتشار و فرکانس مد موج نیز بستگی دارد.

مدل ریاضی انتشار امواج ورقی

برای بررسی امواج ورقی (لمب)، یک مدل کرنش صفحه‌ی دوبعدی در نظر گرفته می‌شود که تنش روی سطوح بالا و پایین آن صفر است. حل دقیق این مسئله با استفاده از توابع پتانسیل جابه‌جایی قبلاً انجام شده است.^[۱۶] برای محاسبه‌ی میدان جابه‌جایی می‌توان از روش تجزیه‌ی هلمهولتز که حاصل جمع دو پارامتر مربوط به امواج طولی و عرضی است، مطابق رابطه‌ی ۱ استفاده کرد:

$$\vec{u} = \nabla\phi + \nabla \times (\vec{\psi}), \quad \nabla \cdot (\vec{\psi}) = 0 \quad (1)$$

که در آن ϕ یک میدان پتانسیل اسکالر متناظر با موج طولی، $\vec{\psi}$ یک میدان پتانسیل برداری متناظر با موج عرضی، و \vec{u} بردار تغییر مکان ذره است. با توجه به فرض مدل کرنش صفحه‌ی، جابه‌جایی در راستای y صفر خواهد بود. با لحاظ کردن این شرایط، مؤلفه‌های تغییر مکان عبارت خواهند بود از:

$$u_x = u = \frac{\partial\phi}{\partial x} + \frac{\partial\psi}{\partial z}, \quad u_y = v = 0, \quad u_z = w = \frac{\partial\phi}{\partial z} - \frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (2)$$

و براساس نظریه‌ی کشسانی، تنش‌ها در حالت کرنش صفحه‌ی مطابق روابط ۳ هستند:^[۱۶]

$$\begin{aligned} \sigma_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) \\ \sigma_{zz} &= \lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ &= \lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

از طرفی می‌دانیم معادلات حاکم بر امواج طولی و عرضی دوبعدی به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ هستند:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad \text{معادله امواج طولی} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad \text{معادله امواج عرضی} \quad (5)$$

با حل معادلات فوق و اعمال شرایط مرزی، معادلات حاکم بر امواج لمب به دست می‌آید. این معادلات به دو بخش متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شوند:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{2k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{متقارن} \quad (6)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{2k^2 pq} \quad \text{نامتقارن} \quad (7)$$

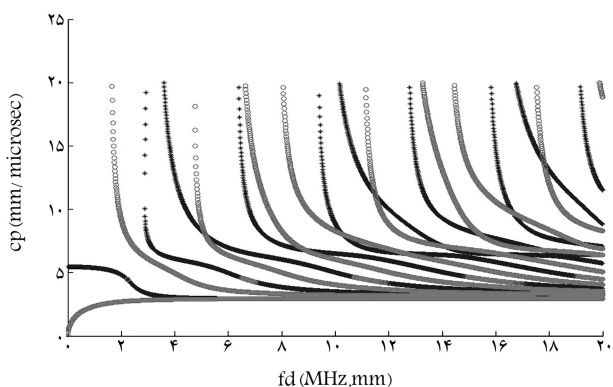
که در آن‌ها q و p عبارت‌اند از:

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 \quad \text{and} \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (8)$$

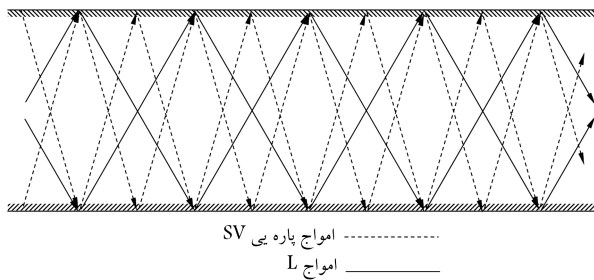
رسم منحنی پاشش

تغییرات سرعت انتشار موج لمب برحسب فرکانس بی‌بعد شده (حاصل ضرب فرکانس در ضخامت) به صورت منحنی‌های پاشش رسم می‌شود. برای رسم این منحنی‌ها معادلات ۶ و ۷ را با روش عددی حل می‌کنیم. این منحنی‌ها برای دو حالت متقارن و نامتقارن به‌طور جداگانه محاسبه شده و رسم می‌شوند.

در این تحقیق پس از اندازه‌گیری سرعت موج طولی و عرضی در ورق مورد آزمایش به کمک یک برنامه‌ی رایانه‌ی منحنی‌های پاشش مطابق شکل ۱ رسم شده‌اند. برای رسم این منحنی‌ها مراحل زیر طی شده است:



شکل ۱. منحنی‌های پاشش سرعت فاز موج لمب برحسب فرکانس بی‌بعد در ورق آلومینیوم.



شکل ۳. چگونگی ایجاد امواج ورقی (لمب) در ورق. [۱۶]

به یکدیگر، حالتی از تشدید در ورق رخ می‌دهد که باعث تولید موج لمب می‌شود (شکل ۳).

در این تحقیق با استفاده از این پدیده و توسط یک پروب تماسی زاویه متغیر، موج لمب در ورق تولید شده است. تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمایشات عبارت‌اند از:

- فرستنده و گیرنده‌ی فراصوتی: یکی از تجهیزاتی که در انجام آزمون‌های فراصوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرستنده و گیرنده‌ی فراصوتی است. محدوده‌ی فرکانسی این دستگاه ۳۵ MHz-۱۰ kHz است. نقش قسمت فرستنده‌ی دستگاه، تولید سیگنال ولتاژ بسیار باریک و نیزه‌یی شکل 1° به منظور تحریک پروب است. با تحریک پروب و تولید موج فراصوتی و ارسال آن به داخل قطعه، قسمتی از موج به پروب بازمی‌گردد. ولتاژ تولید شده توسط کریستال پیزوالکتریک پروب، که بر اثر برخورد موج بازگشتی به آن حاصل می‌شود، توسط قسمت گیرنده‌ی دستگاه دریافت و تقویت می‌شود. از مهم‌ترین مشخصات این دستگاه علاوه بر باند فرکانسی نسبتاً وسیع، ورودی تحریک خارجی آن است. این دستگاه دارای فرکانس تحریک ۵۰۰۰-۱۰۰ Hz است.
- کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال (A/D): به منظور ذخیره‌سازی و پردازش دیجیتالی سیگنال‌های فراصوتی ابراری مورد نیاز است که بتواند سیگنال‌های آنالوگ را به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل کند. دستگاه انجام آزمون شامل یک کارت A/D برای تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال است. این کارت شامل دو کانال ورودی آنالوگ و یک ورودی تحریک خارجی است. بیشینه فرکانس نمونه‌برداری این کارت ۱۴ bit است. برای کنترل MSample/s ۱۰۰ و قابلیت تفکیک‌پذیری آن ۱۴ bit است. برای کنترل و استفاده از این کارت به وسیله‌ی رایانه، از نرم‌افزار خاصی استفاده شده است.
- پروب زاویه متغیر تماسی با فرکانس ۲ MHz

زاویه‌ی مناسب برای تولید موج ورقی (لمب) به کمک قانون اسنل و با در نظر گرفتن سرعت فاز موج لمب به دست می‌آید:

$$\frac{\sin \theta_i}{c_{Plexi}} = \frac{\sin 9^\circ}{c_p} \Rightarrow \sin \theta_i = \frac{c_{Plexi}}{c_p} \quad (10)$$

که در آن θ_i زاویه‌ی موج تابشی، c_{Plexi} سرعت موج در پروب، و c_p سرعت فاز موج در قطعه است. منحنی زاویه‌ی بحرانی (زاویه‌ی مناسب برای تولید موج لمب) برحسب حاصل ضرب فرکانس در ضخامت در شکل ۴ دیده می‌شود.

در انجام آزمایش با توجه به سازوکار تنظیم زاویه‌ی پروب، تنظیم دقیق زاویه بر روی پروب امکان‌پذیر نبود. در نتیجه برای تعیین زاویه‌ی مناسب از شیوه‌ی کاربردی استفاده شد. بدین منظور پروب را بر روی ورق قرار داده و زاویه را در محدوده‌ی قرار می‌دهیم که با منحنی‌های تابش متناسب است و سپس آن را جابه‌جا می‌کنیم تا

۱. تعیین محدوده‌ی مطلوب fd و c_p برای رسم منحنی تابش؛
۲. تقسیم‌بندی این محدوده‌ها به قسمت‌های مساوی و دلخواه با اندازه‌ی ثابت (هرچه تعداد تقسیمات بیشتر شود دقت بالاتر خواهد بود)؛
۳. در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار (fd) ؛
۴. در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار (c_p) ؛
۵. قرار دادن مقادیر fd و c_p در معادلات ۶ و ۷، و تعیین علامت (مثبت یا منفی بودن) جواب حاصل از معادلات؛
۶. قرار دادن مقدار بعدی c_p در معادله و تعیین علامت (مثبت یا منفی بودن) جواب حاصل از معادلات؛
۷. ادامه دادن مراحل ۵ و ۶ تا اتمام مقادیر c_p (بین هر دو مقدار c_p که معادلات تغییر علامت دادند، یک ریشه قرار خواهد داشت)؛
۸. در نظر گرفتن مقدار بعدی fd و بازگشت مجدد به مرحله‌ی ۴.

مراحل فوق زمانی اتمام می‌یابند که تمام مقادیر fd در معادله جاگذاری شوند. با توجه به معادله‌ی ۹، که بیان‌گر رابطه‌ی سرعت گروه و سرعت فاز است، منحنی‌های تابش را برحسب سرعت گروه نیز می‌توان رسم کرد (شکل ۲).

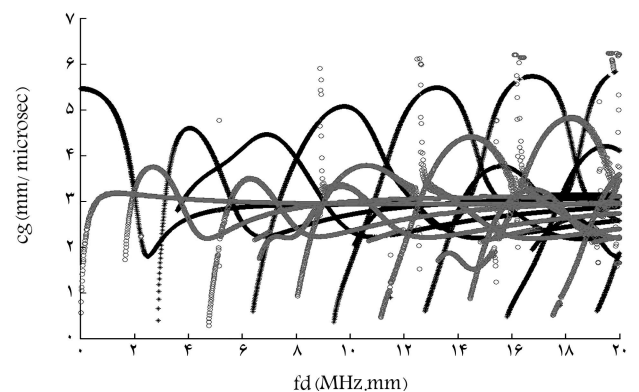
$$c_g = c_p^2 \left[c_p - (fd) \frac{dc_p}{d(fd)} \right]^{-1} \quad (9)$$

برای رسم منحنی تابش به کمک شیوه‌ی ارائه شده فقط و فقط باید از معادلات ۶، ۷ و ۸ استفاده کرد و اعداد را در شکل کنونی این معادلات جایگزین کرد. در غیر این صورت نقاط به دست آمده برای منحنی نامناسب بوده و شکل منحنی دگرگون خواهد شد.

بعد از رسم منحنی‌های تابش، نقاطی اضافی در آن‌ها دیده می‌شود که در یک ویژگی مشترک‌اند و آن، صدق کردن در معادلات ۶ و ۷ -- معادلات مربوط به مدهای متقارن و نامتقارن -- است. با وجود این خصوصیت این نقاط به راحتی قابل حذف‌اند. منحنی‌های تابش با حذف نقاط مذکور ارائه شده‌اند.

تولید موج ورقی

یکی از روش‌های تولید موج ورقی (لمب) تابش موج طولی با زاویه‌ی معین به سطح ورق است. با تابش موج طولی در زوایای معین و تبدیل امواج طولی و عرضی



شکل ۲. منحنی‌های تابش سرعت گروه موج لمب برحسب فرکانس بی‌بعد در ورق آلومینیوم.

جدول ۱. نتایج آزمایشات مربوط به اندازه‌گیری سرعت گروه در ورق‌های آلومینیوم.

ضخامت (mm)	مد موج	سرعت گروه (تجربی) (m/s)	سرعت گروه (نظری) (m/s)	درصد خطا
۰٫۴	S_0	۵۲۷۵	۵۲۹۵	۰٫۳
	A_0	-	۳۱۰۱	-
۰٫۵	S_0	۵۲۳۲	۵۱۸۰	۱٫۰
	A_0	-	۳۱۵۲	-
۰٫۷	S_0	۴۴۳۰	۴۷۷۲	۷٫۱
	A_0	-	۳۱۷۶	-
۱	S_0	میهم	۳۱۵۷	-
	A_0	-	۳۱۵۵	-
	A_1	میهم	۳۲۴۵	-
۲	S_0	میهم	۲۶۲۸	-
	A_0	میهم	۳۰۴۲	-
	S_1	میهم	۴۵۹۶	-
	A_1	میهم	۲۶۰۸	-
	S_2	میهم	۳۱۹۰	-

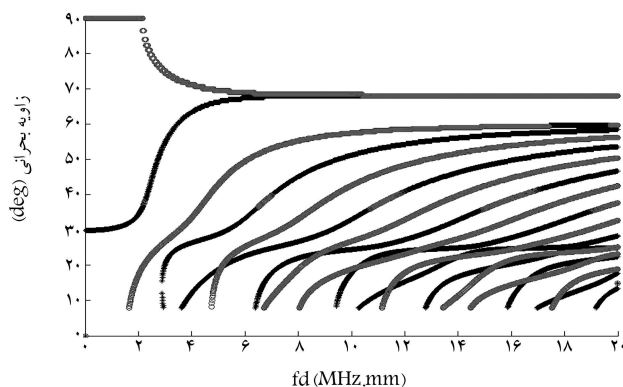
که در این حالت سرعت موج طولی در کفکش بیشتر از سرعت فاز موج لمب در ورق است و سینوس زاویه‌ی بحرانی بیشتر از ۱ خواهد شد. به عبارت دیگر در این حالت زاویه‌ی بحرانی وجود نخواهد داشت. این مسئله برای مد A_0 در ورق آلومینیوم با ضخامت ۱ میلی‌متر نیز صادق است. چنان که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، سرعت گروه مدهای A_1 و S_0 در این ضخامت میهم است. به بیان دیگر، به دست آوردن این مقادیر از طریق انجام آزمایشات ممکن نیست. علت این امر تداخل سیگنال‌های مربوط به این دو مد است.

سرعت گروه برای مد S_0 برابر ۳۱۵۷ متر بر ثانیه و برای مد A_1 برابر ۳۲۴۵ متر بر ثانیه است (جدول ۱). از آنجا که پروب یک طیف فرکانسی و همچنین یک طیف زاویه‌ی تابش دارد، موج تنها با یک زاویه‌ی معین تایید نمی‌شود. در واقع هر دو مد به صورت هم‌زمان تولید می‌شوند. نزدیک بودن سرعت دو مد و کم بودن مسافتی که موج می‌پیماید، سبب تداخل سیگنال‌های مربوط به این دو مد شده و نمی‌توان اطلاعاتی از سیگنال استخراج کرد.

این مسئله در مورد ورق آلومینیوم با ضخامت ۲ میلی‌متر تشدید می‌شود چرا که می‌توان گفت حداقل ۴ مد به طور هم‌زمان ایجاد می‌شوند. واضح است که چنین امری میهم بودن سیگنال دریافتی را دوچندان می‌کند. در نتیجه مناسب‌ترین مد برای انجام آزمون بر روی ورق آلومینیوم به کمک امواج ورقی (لمب)، مد S_0 است.

ساخت نمونه

برای تعیین کیفیت اتصالات چسبی نمونه‌هایی از اتصالات ساخته شد. این نمونه‌ها از دو ورق آلومینیوم با ضخامت ۰٫۴ میلی‌متر ساخته شده‌اند؛ این دو ورق به کمک چسب دوقلو به صورت لبه‌های روی هم افتاده به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۵).



شکل ۴. منحنی پاشش زاویه‌ی بحرانی لمب بر حسب فرکانس بی‌بعد در ورق آلومینیوم.

دامنه‌ی سیگنال بیشینه شود. جایی که دامنه‌ی سیگنال بیشینه باشد موج لمب تولید شده است.

اندازه‌گیری سرعت موج ورقی (لمب) در ورق

برای اندازه‌گیری سرعت به دو پارامتر مسافت و زمان نیاز است. اندازه‌گیری سرعت موج لمب در ورق نیز از این امر مستثنی نیست. برای اندازه‌گیری مسافتی که موج در ورق طی می‌کند، ابتدا لازم است محل دقیق شاخص پروب مشخص شود. از طرفی در پروب زاویه متغیر، محل شاخص (نقطه‌ی خروج موج از پروب) با تغییر زاویه عوض می‌شود. تعیین محل شاخص در هر زاویه به کمک قطعات مرجع امکان‌پذیر است اما مشخص کردن آن بر روی پروب به تجهیزات اضافی (نظیر یک صفحه‌ی مدرج) نیاز دارد. ساختار پیچیده‌ی پروب زاویه متغیر و عبور موج از چند لایه با جنس‌های متفاوت پیش از ورود به قطعه باعث می‌شود تا مسافت دقیق طی شده توسط موج از بدو خروج از کریستال پیزوالکتریک پروب به سادگی قابل محاسبه نباشد. برای حل این مشکل از اختلاف زمان و اختلاف مسافت در دو موقعیت مختلف استفاده شد. ابتدا پروب در فاصله‌ی معینی از لبه‌ی ورق قرار داده شد و زمان به کمک سیگنال دریافتی ثبت شد. سپس پروب را در موقعیت دیگری -- متفاوت از موقعیت اول -- گذاشته و مجدداً زمان ثبت شد. با توجه به در اختیار داشتن دو موقعیت و دو زمان، و با استفاده از اختلاف این دو زمان و این دو موقعیت، سرعت موج در ورق با استفاده از معادله‌ی ۱۱ (و بدون داشتن محدودیت‌های فوق) قابل محاسبه بود. یادآور می‌شود که به هنگام استفاده از اختلاف موقعیت (مسافت)، دانستن محل دقیق شاخص ضروری نیست و فقط کافی است اختلاف موقعیت پروب در دو حالت نسبت به یک سطح مرجع گزارش شود. سرعت اندازه‌گیری شده با این روش، سرعت گروه موج لمب در ورق است. [۱۶]

این آزمایش بر روی ورق‌های آلومینیوم با ضخامت‌های مختلف انجام، و نتایج حاصله در جدول ۱ ارائه شد. چنان که مشاهده می‌شود، در ورق‌های با ضخامت ۰٫۴، ۰٫۵، و ۰٫۷ میلی‌متر مد A_0 تولید نشده تا بتوان سرعت گروه مربوط به آن را اندازه‌گیری کرد. در حقیقت مد A_0 در این ضخامت‌ها قابل تولید نیست.

با توجه به معادله‌ی ۱۰ که مربوط به محاسبه‌ی زاویه‌ی بحرانی (زاویه‌ی تابش موج) برای تولید موج لمب دلخواه است، برای مد A_0 این زاویه وجود ندارد، چرا

طرفی برای دست‌یابی به نتایج دقیق باید دو پروب کاملاً هم‌راستا باشند، در غیر این صورت دامنه‌ی سیگنال دریافتی کاهش می‌یابد یا محو می‌شود. در چنین حالتی سیگنال‌های دریافتی قابل تفسیر نخواهند بود.

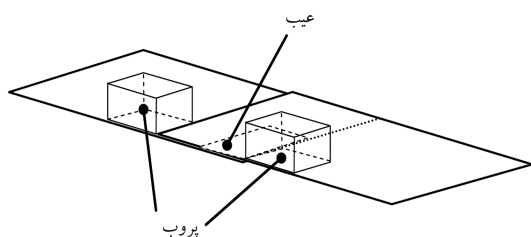
با ثابت نگه‌داشتن موقعیت پروب‌ها نسبت به اتصال چسبی، آن‌ها را در راستای عرض ورق جابه‌جا می‌کنیم تا موج از محل بدون عیب اتصال چسبی نیز عبور کند (شکل ۹).

ابتدا مطابق شکل ۹ موج از محل بدون عیب عبور داده شد که سیگنال دریافتی آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از این سیگنال به‌عنوان سیگنال مرجع اتصال بی‌عیب برای مقایسه با سیگنال اتصالات معیوب استفاده می‌شود. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ سیگنال‌های دریافتی از اتصالات معیوب مربوط به نمونه اول تا نمونه چهارم (به ترتیب) دیده می‌شوند.

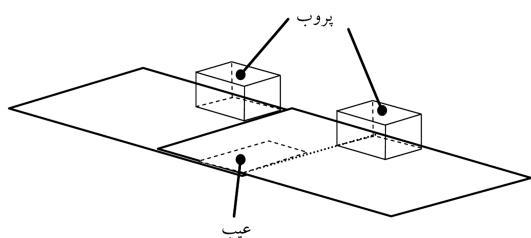
هدف از انجام این آزمایشات تعیین کیفیت اتصالات چسبی است. بعد از برقراری اتصال امکان دسترسی و رؤیت محل اتصال وجود ندارد. از سوی دیگر، شایع‌ترین نقص در اتصالات چسبی عدم برقراری اتصال بین چسب و قطعات در نقاط مختلف اتصال است. هرچه این جدایش بیشتر باشد اتصال ضعیف‌تر، و کیفیت آن نامطلوب‌تر خواهد بود.

در تعیین کیفیت اتصالات، راستای جدایش نسبت به حجم جدایش کم اهمیت‌تر است و در نتیجه، در اینجا هرچه حجم جدایش بیشتر باشد کیفیت اتصال چسبی ضعیف‌تر خواهد بود. در سه نمونه‌ی اول ابعاد عیب (جدایش) در یک راستا افزایش یافته، اما در نمونه‌ی چهارم در عین افزایش اندازه‌ی عیب جهت این افزایش نیز تغییر یافته است.

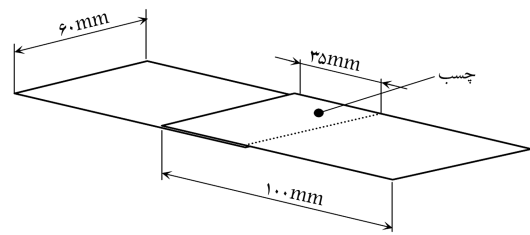
چنان‌که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ دیده می‌شود، با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی عیب (حجم عیب) از نمونه‌ی اول تا چهارم، به ترتیب دامنه‌ی سیگنال‌های دریافتی کاهش یافته است. رابطه‌ی بین دامنه‌ی سیگنال دریافتی و اندازه‌ی عیب در شکل ۱۵ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که رابطه‌ی معینی بین اندازه‌ی عیب و دامنه‌ی موج لمب وجود دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که از مقایسه‌ی دامنه‌ی سیگنال دریافتی با دامنه‌ی سیگنال مرجع (نمونه سالم)، طبقه‌بندی نمونه‌ها از منظر کیفیت اتصال امکان‌پذیر خواهد شد.



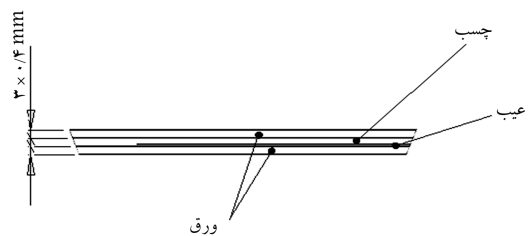
شکل ۸. موقعیت پروب‌ها هنگام انجام آزمون محل معیوب اتصال چسبی.



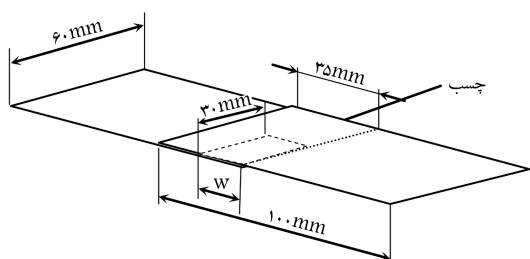
شکل ۹. موقعیت پروب‌ها هنگام انجام آزمون محل سالم اتصال چسبی.



شکل ۵. شکل کلی نمونه.



شکل ۶. محل اتصال در ورق، با وجود عیب (دید از کنار).



شکل ۷. نمونه با عیبی به عرض W .

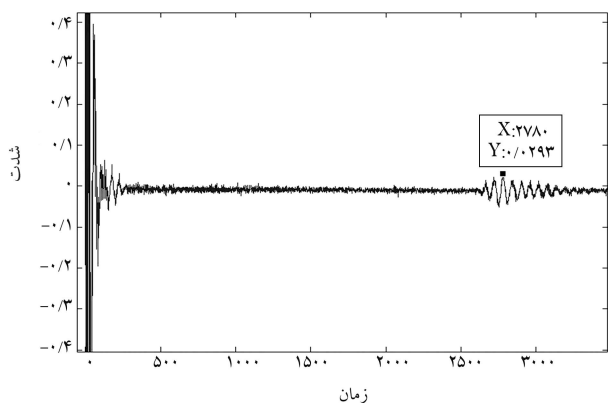
در یکی از این نمونه‌ها در بخشی از اتصال و بر روی یکی از ورق‌ها قبل از اعمال چسب دوقلو، تکه‌ی کاغذ به‌کمک چسب نواری قرار داده شد تا مطمئن باشیم در این قسمت چسب دوقلو به ورق متصل نشده و عملاً یک عیب در این اتصال به وجود می‌آید. در ضمن برای اطمینان از یکسان بودن ضخامت چسب در نمونه‌های مختلف، از قطعات ورق با ضخامت 0.4 میلی‌متر به‌عنوان فاصله‌دهنده استفاده شد تا ضخامت چسب معادل 0.4 میلی‌متر ثابت بماند. در شکل ۶ ابعاد قطعه و اتصال و جزئیات بیشتری از چسب، عیب و ورق نشان داده شده است.

تفاوت نمونه‌ها در ابعاد و اندازه‌ی عیب آن‌هاست، که در شکل ۷ عرض عیب با W مشخص شده است. در نمونه‌ی اول تا سوم، اندازه‌ی W به ترتیب 15 ، 10 و 20 میلی‌متر است و در نمونه‌ی چهارم ضخامت عیب نسبت به نمونه‌ی سوم دو برابر شده است.

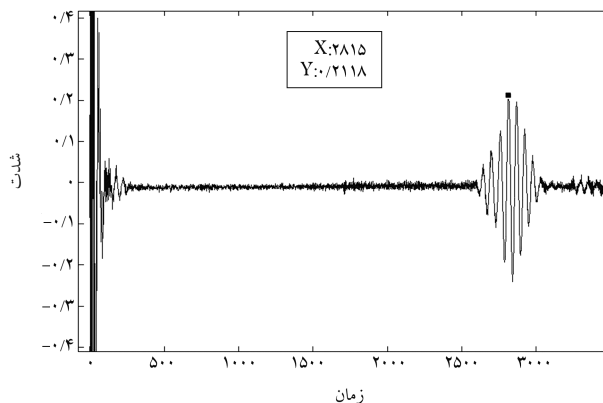
انجام آزمایش

برای بررسی اتصالات از دو پروب زاویه متغیر استفاده شد. زاویه‌ی پروب‌ها به‌گونه‌ی تنظیم شدند که در آن، موج لمب تولید شود. لازم به ذکر است که دقیقاً در همان زاویه‌ی که موج لمب تولید می‌شود، این موج قابل دریافت است.

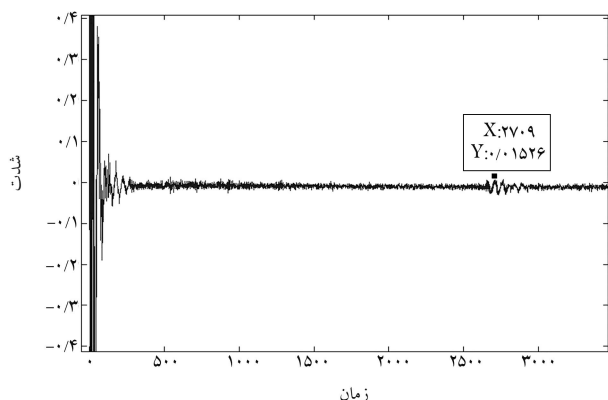
هر پروب روی یکی از ورق‌ها قرار گرفت، به طوری که یک پروب نقش فرستنده و دیگری نقش گیرنده را ایفا کند. موقعیت پروب‌ها به‌گونه‌ی انتخاب شد که موج ارسال از اتصال چسبی عبور کرده و در سوی دیگر دریافت شود (شکل ۸). از



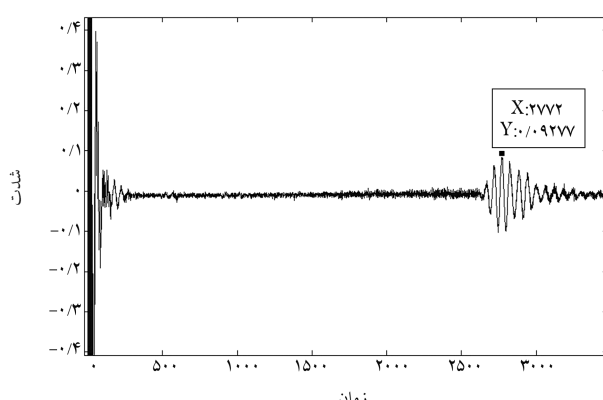
شکل ۱۳. سیگنال دریافتی از نمونه‌ی ۳، با عیبی به طول ۲۰ میلی‌متر.



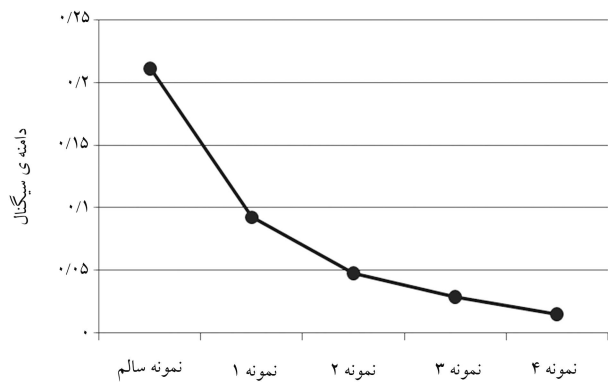
شکل ۱۰. سیگنال دریافت شده از اتصال چسبی سالم.



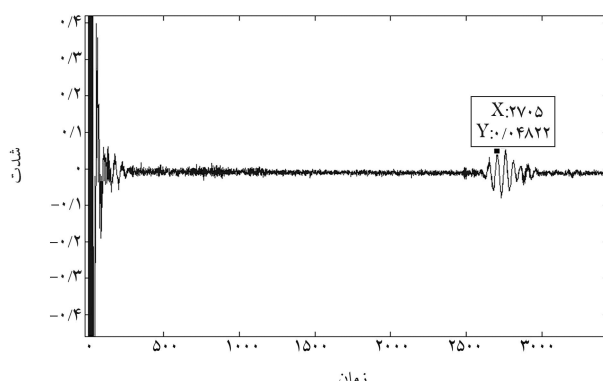
شکل ۱۴. سیگنال دریافتی از نمونه‌ی ۴، با عیبی به طول ۲۰ میلی‌متر و ضخامت دو برابر عیوب دیگر.



شکل ۱۱. سیگنال دریافتی از نمونه‌ی ۱، با عیبی به طول ۱۰ میلی‌متر.



شکل ۱۵. منحنی رابطه‌ی ابعاد عیب با دامنه‌ی سیگنال موج فراصوتی.



شکل ۱۲. سیگنال دریافتی از نمونه‌ی ۲، با عیبی به طول ۱۵ میلی‌متر.

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات و آزمایشات انجام‌گرفته با استفاده از امواج لمب می‌توان گفت:

- بهترین حالت برای آزمایش اتصالات چسبی در ورق‌های آلومینیومی، (به کمک امواج لمب و در حالت تماسی)، استفاده از محدوده‌ی ابتدایی منحنی پاشش است که فقط تک‌مد S_0 در آن تولید می‌شود. این امر با یافته‌های دیگر محققین مطابقت دارد.^[۱۴]
- کنترل کیفیت اتصالات چسبی در ورق‌ها (اتصالات با لبه‌های روی هم)، از نظر وجود عیب یا عدم جدایش بین چسب و ورق، به کمک امواج لمب مقدور است. با

عبور موج لمب از اتصال چسبی سیگنالی دریافت می‌شود که بیشینه دامنه‌ی آن با ابعاد عیب رابطه‌ی معکوس دارد. به بیان دیگر، بزرگ شدن عیب به کاهش دامنه می‌انجامد. با مقایسه‌ی دامنه‌ی سیگنال دریافتی از عیب با سیگنال دریافتی از اتصال سالم (سیگنال مرجع) می‌توان کیفیت اتصالات را ارزیابی کرد.

- هم‌راستا بودن موقعیت دو پروب نسبت به یکدیگر از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر کمی موقعیت دو پروب نسبت به یکدیگر نامناسب باشد، سیگنال دریافتی غیرقابل قضاوت خواهد بود. استفاده از یک سازوکار نگاه‌دارنده بین دو پروب می‌تواند این مشکل را به خوبی حل کند.

پانوشته

1. plate waves
2. Lamb waves
3. Defense & evaluation research agency
4. Cawley
5. electromagnetic acoustic transducer
6. tone burst
7. Shizuoka
8. lap joint
9. dispersive
10. spike

منابع

1. Worlton, D.C. "Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies", *Journal of Applied Physics*, **32**, pp. 967-971 (1961).
2. Mindlin, R.D., *Waves and Vibrations in Isotropic Elastic Plates*, in Structural Mechanics, Goodier J.N. and Hoff N.J. (eds), Pergamon Press, New York (1960).
3. Saravanos, D.A. and Heyliger, P.R. "Coupled layer-wise analysis of composite beams with embedded piezoelectric sensors and actuators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **6**, pp. 350-362 (1995).
4. Saravanos, D.A.; Birman, V. and Hopkins, D.A. "Detection of delaminations in composite beams using piezoelectric sensors", *Proceedings of the 35th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference of the AIAA* (1994).
5. Percival, W.J. and Birt, E.A. "A study of Lamb wave propagation in carbon-fibre composites", *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, **39**, pp. 728-735 (1997).
6. Monkhouse, R.S.C.; Wilcox, P.D. and Cawley, P. "Flexible interdigital PVDF transducers for the generation of Lamb waves in structures", *Ultrasonics*, **35**, pp. 489-498 (1997).
7. Monkhouse, R.S.C.; Wilcox, P.W.; Lowe, M.J.S.; Dalton, R.P. and Cawley, P. "The rapid monitoring of structures using interdigital Lamb wave transducers", *Smart Materials and Structures*, **9**, pp. 304-309 (2000).
8. Kessler, S.S.; Spearing, S.M.; Atalla, M.J.; Cesnik, C.E.S. and Soutis, C. "Structural health monitoring in composite materials using frequency response methods", *Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials* (2001).
9. Dixon, S.; Edwards, C. and Palmer, S.B. "A laser-EMAT system for ultrasonic weld inspection", *Ultrasonics*, **37**, pp. 273-281 (1999).
10. Jeong, H.D.; Shin, H.J. and Rose, J.L. "Detection of defects in a thin steel plate using ultrasonic guided wave", *Proceedings of the 15th WCNDT*, Roma, Italy, pp. 15-21 (October 2000).
11. Hayashi, Y.; Ogawa, S.; Cho, H. and Takemoto, M. "Non-contact estimation of thickness and elastic properties of metallic foils by the wavelet transform of laser-generated Lamb waves", *NDT&E International*, **32**, pp. 21-27 (1999).
12. Gao, W.; Glorieux, C. and Thoen, J. "Laser ultrasonic of Lamb waves: Determination of the thickness and velocities of a thin plate", *International Journal of Engineering Science*, **41**, pp. 219-228 (2003).
13. Hayashi, T. and Kawashima, K. "Single mode extraction from multiple modes of Lamb wave and its application to defect detection", *JSME International, Series A*, **46**(4), pp. 620-626 (2003).
14. Santos, M. and Perdigao, J. "Leaky Lamb waves for the detection and sizing of defects in bonded aluminum lap joints", *NDT&E International*, **38**, pp. 561-568 (2005).
15. Jhang, K.Y.; Shin, M.J. and Lim, B. "Application of the laser generated focused-Lamb wave for non-contact imaging of defects in plates", *Ultrasonics*, **44**, pp. e1265-e1268 (2006).
16. Rose, J.L., *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press (1999).

