

استفاده از روش نشر اکوستیک برای مطالعه خرابی سطح در فرایند اصطکاک

مهدی احمدی^۱

* نویسنده مسئول: ahmadinajafabadi@iaud.ac.ir

چکیده

در این مقاله با استفاده از پایش سیگنال الکتریکی یک سامانه نشر اکوستیک، تغییر شرایط در سطح مالش مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. اصطکاک با لغزش یک حلقه فولادی بر سطح یک ورق فلزی شبیه سازی شده است. در اثر حرکت حلقه، آشوب مکانیکی در سطح فلز ایجاد می شود که به صورت امواج تنشی در سطح منتشر می شود. با استفاده از یک حسگر پیزوالکتریک، جابه جایی ناشی از گذر موج تنش به صورت سیگنال الکتریکی دریافت می شود که از آن برای تحلیل وضعیت اصطکاک استفاده می شود. نتایج به دست آمده نشان می دهد که میزان تأثیر عوامل مختلف مثل نیروی عمودی، جنس مواد و استفاده از روانکار بر خرابی سطح را می توان با تحلیل سیگنال الکتریکی مشاهده کرد. به عنوان مثال، مطالعه سیگنال حاصل از مالش دو سطح نشان می دهد که با مضمحل شدن لایه نازک روانکار بین دو سطح، سیگنال های مربوط به تشکیل خرابی های میکروسکوپی با دامنه و فرکانس معین ظاهر می شوند. حساسیت روش مورد استفاده برای تشخیص خرابی نسبت به روش پایش اصطکاک به مراتب بیشتر بوده و از این روش می توان برای پایش وضعیت سطح در فرایند اصطکاکی استفاده کرد.

واژه های کلیدی: اصطکاک، نشر اکوستیک، سایش، پایش خرابی.

۱- مقدمه

سایش در حین کار ماشین یا ابزار به طور درجا^۱ مورد توجه قرار گیرد. به همین دلیل روش‌های نگهداری پیشگیرانه^۲، که مبتنی بر پایش^۳ عملکرد ماشین بوده و هشدار خرابی را به طور آنی^۴ صادر می‌کند، توجه زیادی را به خود معطوف داشته است. تعیبه ابزارهای داده‌برداری که به روش‌های مختلف از جمله حرارتی و ارتعاشی کار می‌کنند، در مناطق حساس به اصطکاک و سایش شرایط پایش دائمی ماشین را فراهم می‌کند. با این حال این ابزارها عموماً از حساسیت کافی برخوردار نبوده و سایش را زمانی گزارش می‌کنند که مقدار خرابی از حد مجاز گذر کرده و دیگر انجام اقدامات پیشگیرانه مفید نخواهد بود.

اخیراً محققین توجه خود را به روش‌های نشرکننده^۵ که دارای حساسیت بیشتری هستند معطوف داشته‌اند. این روش‌ها مبتنی بر ثبت نشر ناشی از وقوع پدیده‌های فیزیکی گوناگون در ماده می‌باشند. روش‌های نشرکننده بر اساس نشر الکترون، میدان الکترومغناطیس و نشر اکوستیک^۶ [۱] کار می‌کنند. وقوع پدیده‌های همراه با اصطکاک و سایش نیز نشر اکوستیک تولید می‌کند. با توجه به توسعه روش نشر اکوستیک در جنبه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری و نتایج امیدوارکننده آن، محققین به استفاده از این روش در عیب‌یابی مجموعه‌های تریبولوژیکی نظر مساعد نشان داده‌اند.

امواج نشر اکوستیکی در اثر جابه‌جایی کوچک در سطح ماده تولید می‌شوند. چنین جابه‌جایی‌هایی خود در اثر آزاد شدن سریع انرژی در ماده و متعاقب آن تشکیل امواج تنشی به وجود می‌آیند. برای شناسایی منبع آزاد شدن انرژی (مثلاً مالش دو سطح به یکدیگر)، جابه‌جایی در سطح توسط حسگر پیزوالکتریک به ولتاژ متناسب با آن تبدیل می‌شود. به این ترتیب، روش نشر اکوستیکی مبتنی بر ثبت و تحلیل امواج نشر ناشی از جابه‌جایی‌های الاستیکی با فرکانس بالا در سطح مواد است [۲].

پدیده سایش یکی از پدیده‌های رایج در مبحث خرابی یاتاقان‌ها در ماشین آلات صنعتی، ابزارهای شکل‌دهی و براده‌برداری است. در نگهداری پیشگیرانه با استفاده از داده‌هایی که توسط سامانه‌های پایش به دست می‌آید چگونگی وقوع خرابی را در سطوح مالش ارزیابی می‌کنند. سامانه‌های داده‌برداری سایش با اصول فیزیکی مختلفی مانند اندازه‌گیری دما و ارتعاش کار می‌کنند. با افزایش خرابی و کاهش کیفیت سطوح مالش، اصطکاک بین دو سطح زیاد شده و این امر بخشی از انرژی حرکتی را به حرارت تبدیل می‌کند، یا با تغییر هندسی سطح سبب تولید ارتعاش می‌شود. هر یک از این روش‌ها دارای حساسیت محدودی بوده و عملاً تا خرابی از حد معینی بیشتر نشود قابل شناسایی نیست. در روش نشر اکوستیک، امواج الاستیک داخل قطعه موقعی که به حسگر نصب شده بر روی سطح می‌رسند، سیگنال الکتریکی متناسب با موج الاستیک تولید می‌کنند. از آنجا که مالش دو سطح، امواج تنشی در ماده تولید می‌کند می‌توان با استفاده از این روش خصوصیات این امواج را اندازه‌گیری کرده و با تحلیل آنها عامل بروز امواج، یعنی پدیده اصطکاک را مورد بررسی قرار داد.

اصطکاک بین دو سطح جامد و حتی گاهی سطوح روانکاری شده به وجود می‌آید. در مطالعه موضوعات تریبولوژیکی، دانستن تغییراتی که به واسطه اصطکاک در سطوح به وجود می‌آید از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از عمده‌ترین عواملی که مستقیماً یا به طور غیرمستقیم در عملکرد غیرصحیح یاتاقان‌ها و ابزارهای تغییر شکل فلزات دخالت دارد پدیده سایش ناشی از اصطکاک است. این پدیده در سطوح بخش‌های متحرک اجزای ماشین آلات و ابزارها سبب اتلاف مقدار قابل توجهی از انرژی و در نتیجه کاهش بازدهی می‌شود. از نظر دسته بندی علوم مهندسی، موضوع سایش در حوزه تریبولوژی، یا علم مربوط به اصطکاک قرار می‌گیرد. به همین دلیل بسیاری از متخصصین در این زمینه تحقیق خود را به شناخت جنبه‌های مختلف این موضوع اختصاص داده‌اند.

بررسی دقیق مکانیزم ایجاد سایش معمولاً با بررسی سطوح قطعات ساییده شده، پس از توقف ماشین، انجام می‌شود. این محدودیت سبب شده است که بررسی مکانیزم

۱- In-situ

۲- Preventing maintenance

۳- Monitoring

۴- Online

۵- Emission

۶- Acoustic emission

سابقه استفاده از نشر اکوستیک در مطالعه فرایندهای اصطکاکی

اگرچه به صورت بنیادی اطلاعات اندکی در مورد منابع تولید نشر اکوستیک ناشی از اصطکاک لغزشی انتشار یافته است [۳-۱] با این حال، گزارش‌های امیدوار کننده‌ای در مورد پتانسیل این روش در بررسی پدیده اصطکاک و سایش وجود دارد [۳]. بلیبی و همکارانش [۴] از روش‌های نشر اکوستیک برای مطالعه اصطکاک و سایش در یک سیستم تریبولوژیک فلز-پلیمر استفاده کردند. دیبی [۵] نتایج به دست آمده از کارهای دیگران را [۶-۷] با اندازه‌گیری‌های نشر اکوستیک در حین آزمون‌های لغزش بین-روی-دیسک [۸] مورد مقایسه قرار داد و نشان داد که رابطه نزدیکی بین سیگنال نشر اکوستیک و کار انجام شده توسط اصطکاک بین دو سطح وجود دارد. این ارتباط در قالب تابع توانی بین ولتاژ rms نشر اکوستیک و نرخ اتلاف انرژی اصطکاکی مطرح گردید. ماساکی [۹] رابطه بین نشر اکوستیک و صافی سطح اولیه را با استفاده از آزمون بین-روی-دیسک مورد تحقیق قرار داد و معیار rms نشر اکوستیک را برای شناسایی تغییر در مکانیزم‌های سایش معتبر دانست. رانگ والا و دورنفلد [۱۰] از آنالیز سیگنال نشر اکوستیک برای مطالعه ویژگی‌های سطوح در تماس با هم استفاده کردند. لینگارد و انجی [۱۱] با یک مدل، رابطه بین شمارش^۱ سیگنال نشر اکوستیک و کار حاصل از اصطکاک را پیشنهاد نمودند. هیساکادو و وراشینا [۱۲] آزمون‌های اصطکاک را در یاتاقان تحت شرایط روغنکاری و صافی سطوح مختلف انجام دادند و نرخ اتفاقات نشر اکوستیک^۲ و نرخ سایش و ضریب اصطکاک را در رابطه با یکدیگر بررسی کردند.

۳- روش تحقیق

برای انجام آزمایش اصطکاک نیاز به طراحی یک مجموعه آزمایش می‌باشد تا اولاً شرایط اصطکاک را شبیه‌سازی کند و ثانیاً امکان اندازه‌گیری نیروها و سیگنال‌های نشر اکوستیک در آن وجود داشته باشد. برای این منظور مجموعه‌ای برای انجام آزمایش اصطکاک آماده گردید. در شکل (۱-الف) تصویر مجموعه آزمایش ارائه شده است.

اولین کاربرد عملی نشر اکوستیک در پایش مجموعه‌های تریبولوژیکی در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی صورت گرفته است و تاکنون پیشرفت زیادی در استفاده از این روش به وجود آمده است و در سالهای اخیر نیز در پایش وضعیت ماده و تشخیص از کارافتادگی قطعات مهندسی با موفقیت به کار گرفته شده است. هدف از این تحقیق مشخص کردن چگونگی ارتباط سیگنال نشر اکوستیک با پدیده اصطکاک تحت شرایط متفاوت است. علاوه بر این، بررسی امکان استفاده از داده‌های نشر اکوستیک به منظور تشخیص خرابی‌های ناشی از اصطکاک در اتصالات متحرک و یاتاقان‌ها نیز مورد نظر است.

۲- زمینه تئوری

در ادامه مقاله به زمینه تئوری بحث پرداخته می‌شود.

اصطکاک و سایش

جابه‌جایی نسبی سطوح دو ماده در تماس با یکدیگر به پدیده سایش منجر می‌شود. در فرایند سایش، سطوح به طور تدریجی در سه مرحله زیر دچار تغییر شکل پلاستیک شده و نهایتاً مواد جدا می‌شوند:

مرحله اول: در این مرحله پستی و بلندی‌های سطوح در تماس با یکدیگر تغییر شکل می‌دهند. در این مرحله برجستگی‌های روی سطح تا حدی کوتاه شده و سبب کاهش نیروی اصطکاک و حرارت ناشی از آن شده و نرخ سایش کم می‌شود.

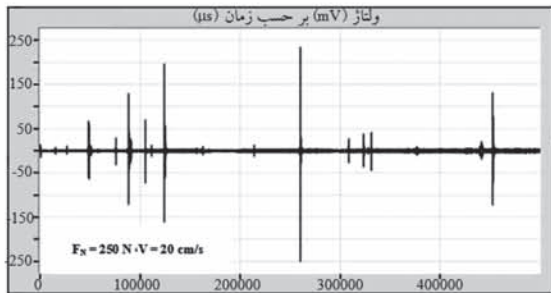
مرحله پایدار: در این مرحله نیروی اصطکاک و نرخ سایش ثابت باقی می‌مانند.

مرحله نهایی: در این مرحله در اثر وقایعی چون آسیب دیدگی سطوح، افزایش بار، بالا رفتن دمای تماس، فقدان روانکاری مناسب، تشکیل ذرات خارجی در محل تماس و آسیب دیدن لایه‌های سطحی، اصطکاک و نرخ سایش افزایش می‌یابند.

به طور کلی در اثر اصطکاک دو مکانیزم عمده خرابی در سطوح به وجود می‌آید. یکی ایجاد اتصال بین دو سطح در اثر فشار و دیگری تغییر شکل رانشی به علت تنش برشی. علاوه بر این‌ها، مکانیزم‌های خرابی دیگری مثل خستگی، کاویتاسیون و خوردگی نیز ممکن است (در مواردی) در فرایند خرابی سطح دخالت داشته باشند.

۱-Count

۲-Acoustic emission event rate



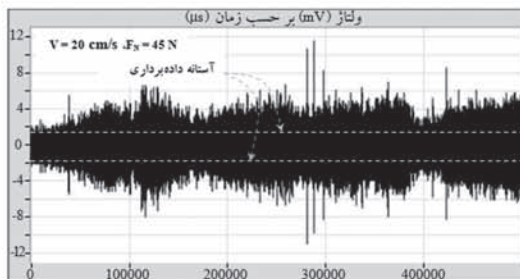
شکل (۲) شکل موج (ولتاژ- زمان) در آزمایش بر روی فولاد زنگ نزن ۳۰۴.

لازم به ذکر است که دامنه سیگنالی که در نمودار شکل موج توسط دستگاه نشان داده می شود بر حسب میلی ولت است که به مشخصه های مربوط به تنظیم دستگاه (ولتاژ آستانه تحریک و بهره پیش تقویت کننده^۲) بستگی دارد و ارتباط بین آنها با رابطه زیر بیان می شود:

$$V_{display} (mV) = 10^{-3} \times V_{ref} (\mu V) \times 10^{\frac{dB_{pre} + dB_{thr}}{20}} \quad (1)$$

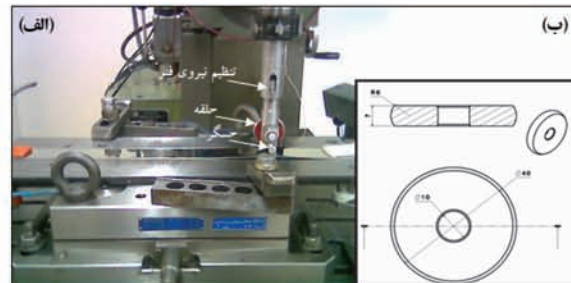
که در آن $V_{display}$ ولتاژ نشان داده شده در نمودار صفحه نمایش بر حسب میلی ولت و V_{ref} ولتاژ مرجع است که در اینجا یک میکروولت در نظر گرفته می شود. اندیس های pre و thr به ترتیب بیانگر حد آستانه و پیش تقویت کننده می باشند.

در آزمایش ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴ تحت نیروی بالاتر از ۲۵۰ نیوتن، همراه با روانکار، اصطکاک شبیه سازی و شکل موج ایجاد شده توسط حسگر نشر اکوستیک ثبت شد، شکل (۳) را ببینید.



شکل (۳) شکل موج سیگنال در آزمایش حلقه روی ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴.

همانطور که در شکل دیده می شود مجموعه آزمایش شامل یک حلقه ثابت و یک سطح متحرک است. جنس حلقه از فولاد ۱/۲۴۳۶ و دارای سختی HRC ۵۸ است. مشخصات هندسی حلقه در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. حلقه به کمک نیروی فنر روی ورق فشرده می شود. جهت ایجاد حرکت نسبی بین ورق و ابزار از میز دستگاه سنگ استفاده شده است. پس از رسیدن حلقه به انتهای ورق حرکت میز متوقف شده و میز دستگاه به طور عرضی قدری جابه جا می شود و مجدداً در جهت عکس حرکت قبلی حرکت کرده و به این ترتیب به صورت منقطع می توان مسیرهای تا چند ده متر را تا مرحله ایجاد سایش تامین نمود. در آزمایش، امکان اعمال سرعت های حرکت زیاد تا ۲۰ cm/s وجود دارد. ارتعاشات ناشی از اصطکاک توسط حسگری که روی حلقه نصب شده است دریافت می شود. نیروی اصطکاک و نیروی عمودی به وسیله یک دینامومتر که روی میز نصب شده است اندازه گیری می شود.



شکل (۱) مجموعه آزمایش شبیه سازی اصطکاک (الف) و ابعاد حلقه (ب).

در آزمایش، از ورق های فولاد زنگ نزن ۳۰۴، آلومینیوم ۱۰۰۰ و ورق مسی (۹۹/۹٪) با عرض ۴۰ میلی متر استفاده شده است. این آزمایش یکبار تحت شرایط خشک (سطوح خشک و چربی زدایی شده) و یکبار تحت شرایط استفاده از روانکار (روغن شماره ۱۰) انجام گرفت.

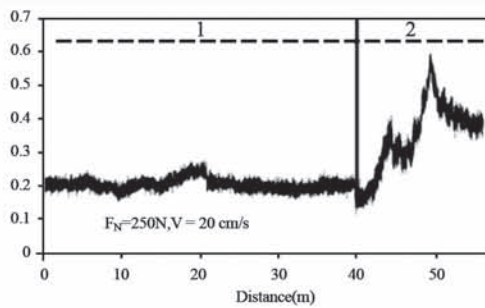
۴- نتایج آزمایش و بحث

در ادامه در مورد نتایج به دست آمده بحث شده است.

مقایسه روش نشر اکوستیک با روش پایش اصطکاک خروجی حسگر (سیگنال نشر اکوستیک) حاصل از فرایند اصطکاک به صورت شکل موج^۱ ذخیره می شود. شکل موج سیگنال به دست آمده از آزمایش روی ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴، برای مدت ۰/۵ S تحت بار عمودی ۴۵ نیوتن، در شکل (۲) نشان داده شده است.

۲ - Preamplifier gain

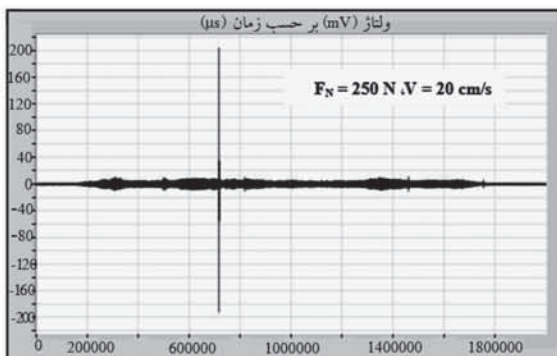
۱ - Waveform



شکل (۵) ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده در آزمایش شکل (۳).

در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که در قسمتی که با شماره ۱ مشخص شده است ضریب اصطکاک تقریباً ثابت و دارای مقدار متوسط 0.2 است ولی بعد از طی مسافت 40 متر سایش حلقه روی ورق، ضریب اصطکاک ناپایدار می‌شود، ناحیه ۲ شکل (۵) را ببینید. شکی نیست که افزایش و ناپایداری در اصطکاک به دلیل خرابی سطوح اتفاق می‌افتد ولی با پیش اصطکاک به تنهایی نمی‌توان به طور دقیق مشخص کرد که اولین خرابی‌ها در چه زمان به وجود آمده‌اند.

شکل (۶) نمودار تغییرات دامنه سیگنال نشر آکوستیک مربوط به آزمایش شکل (۳) را در مدت $1/8$ ثانیه (معادل با حدود 36 cm لغزش حلقه روی سطح ورق) نشان می‌دهد. نمودار در ثانیه 0.72 وجود قله منفردی با دامنه بسیار بالاتر از دامنه سیگنال پیوسته را نشان می‌دهد. وجود این قله به منزله ایجاد خرابی در سطح تلقی شد. به همین دلیل، در آزمایش‌های بعدی هر بار پس از مشاهده چنین قله‌ای بلافاصله آزمایش قطع و سطوح مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه بررسی تشکیل خرابی در سطح را تأیید می‌کرد.



شکل (۶) سیگنال نشر آکوستیک مربوط به آزمایش شکل (۳).

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود یک شکل موج پیوسته و با دامنه کم به همراه تعدادی شکل انفجاری از داده‌های خروجی حسگر ثبت شده است. موج پیوسته با دامنه کم مربوط به صدای ناشی از مالش حلقه روی ورق است در حالی که قله‌های انفجاری به وقایع گذرا و پرنرژی مثل شکست مربوط‌اند. با مطالعه سطح حلقه بعد از آزمایش مطابق شکل (۴) خرابی ناشی از جوش سرد بر آن مشاهده می‌شود که می‌توان دلیل ظهور قله‌های انفجاری در شکل (۳) را به بریده شدن این جوش‌ها نسبت داد.



شکل (۴) سطح حلقه مربوط به آزمایش شکل (۳)

بر این اساس به رغم استفاده از روانکار بین ورق و حلقه، خرابی‌های جوش سرد به وجود آمده است که علت آن را می‌توان به فاز فولاد 304 که آستنیتی است نسبت داد. فاز آستنیت در این فولاد دارای ضریب انتقال حرارت پائین است که شرایط مناسبی برای تشکیل جوش سرد بین دو سطح ایجاد می‌نماید. البته فشار بالا نیز می‌تواند به پاره شدن فیلم روغن و تماس مستقیم سطوح کمک نماید.

مکانیزم‌های خرابی که منجر به ناصافی سطح می‌شوند می‌توانند ضریب اصطکاک را تغییر دهند. واندرهاید و ولد [۱۳] و گاید و همکارانش [۱۴] نیز به تغییرات در ضریب اصطکاک در سطح به دلیل وقوع خرابی ناشی از جوش سرد و پاره شدن محل اتصال اشاره کرده‌اند.

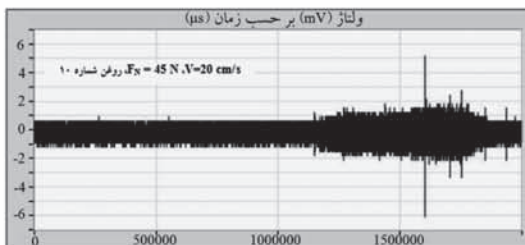
برای بررسی تأثیر خرابی سطح در تغییر ضریب اصطکاک در این آزمایش، با استفاده از نسبت نیروی عمود بر سطح و نیروی کشش حلقه روی ورق، ضریب اصطکاک برای آزمایش شکل (۳) در هر زمان قابل محاسبه است. از طرف دیگر با توجه به سرعت ثابت لغزش حلقه بر سطح ورق (20 cm/s) مسافت پیموده شده توسط حلقه در هر زمان مشخص است. در نمودار شکل (۵) ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده توسط حلقه، بر گرفته از نتایج آزمایش ۳، رسم شده است.

از مقایسه دو نمودار شکل (۷) می‌توان این‌طور برداشت کرد که نشر اکوستیک تشکیل خرابی ناشی از جوش سرد دارای طیف فرکانسی در همین محدوده (۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوهرتز) است.

تأثیر جنس ورق بر سیگنال اصطکاک

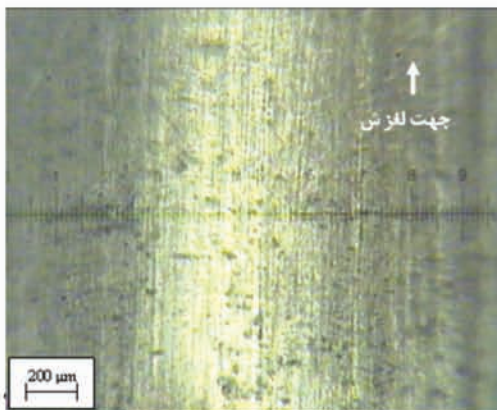
برای بررسی تأثیر جنس ورق، علاوه بر فولاد زنگ‌نزن، آزمایش اصطکاک روی ورق‌هایی از جنس مس و آلومینیم نیز انجام گرفت. هر دو آزمایش در نیروی ۴۵ نیوتن و در حضور روانکار (روغن شماره ۱۰) انجام گرفت.

شکل (۸) شکل موج مربوط به آزمایش روی ورق مسی را برای مدت ۲ ثانیه، که تقریباً معادل ۴۰ cm مسافت لغزش حلقه می‌باشد، نشان می‌دهد.



شکل (۸) شکل موج (ولتاژ-زمان) در آزمایش حلقه روی ورق مسی در مدت ۲ ثانیه.

در شکل (۹) تصویری از سطح حلقه بعد از طی مسافت ۴۰cm نشان داده شده است که در آن اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از کشیده شدن حلقه روی ورق مشاهده می‌شود ولی اثری از خرابی ناشی از جوش سرد وجود ندارد.



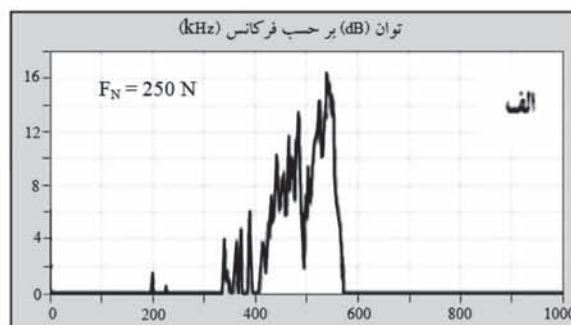
شکل (۹) سطح حلقه بعد از طی مسافت ۴۰ cm روی ورق مسی روغن شماره ۱۰.

با مقایسه روش پایش ضریب اصطکاک، شکل (۵)، با روش نشر اکوستیک، شکل (۶) مشاهده می‌شود که اگر چه روش نشر اکوستیک تشخیص خرابی را در ثانیه ۰/۷۲ یعنی پس از ۱۴/۴ m لغزش حلقه نشان می‌دهد ولی در روش پایش اصطکاک آثار خرابی پس از حدود ۴۰m لغزش ظاهر می‌شود که این بیان‌کننده حساسیت کم این روش است. به این معنا که در این روش تا خرابی به اندازه کافی بزرگ نشود نمی‌توان آن را تشخیص دهد. بنابراین در روش نشر اکوستیک تشخیص خرابی در زمان خیلی کوتاه‌تر حاصل می‌شود.

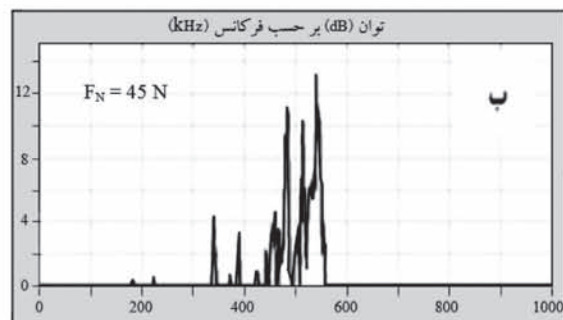
تأثیر نیروی عمودی

در شکل (۷) نمودارهای توزیع توان سیگنال بر حسب فرکانس از داده‌های شکل موج سیگنال استخراج و برای دو آزمایش، با نیروی عمودی ۴۵ نیوتن در شکل ۲ و ۲۵۰ نیوتن در شکل (۳) نشان داده شده است.

اگر چه دو نمودار از نظر ظاهری تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند ولی محتوای فرکانسی ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوهرتز در آزمایش با نیروی بالاتر (۷-الف) به طور چشمگیری نسبت به آزمایش با نیروی کمتر (۷-ب) بیشتر است.



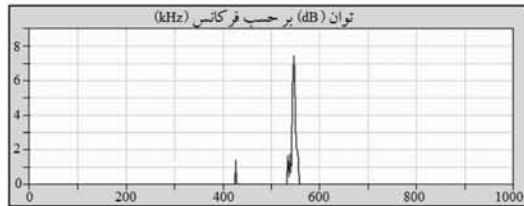
الف- تحت نیروی عمودی ۲۵۰N.



ب- تحت نیروی عمودی ۴۵N.

شکل (۷) توان موج بر حسب فرکانس.

در شکل (۱۲) توزیع توان موج بر حسب فرکانس مربوط به آزمایش حلقه روی آلومینیوم نشان داده شده است. قله‌های توان در فرکانس ۵۴۰ kHz دیده می‌شود که مشابه فرکانس قله در آزمایش فولاد زنگ نزن ۳۰۴ است.



شکل (۱۲) توان موج بر حسب فرکانس مربوط به آزمایش شکل (۱۰).

از مقایسه نتایج آزمایش روی ورق‌های مسی و آلومینیومی و با استناد به شکل موج نشر آکوستیک می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری نمود که تحت شرایط یکسان اصطکاکی، در آلومینیم کرد که نسبت به مس زودتر اتفاق می‌افتد که با توجه به ضریب چسبندگی بیشتر آلومینیوم نسبت به مس قابل توجیه است [۱۵].

سیگنال آزمایش لغزش حلقه روی ورق‌های آلومینیومی، مسی و فولاد زنگ نزن، در زمانی که اولین قله‌های انفجاری تشکیل شد، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه نشان داد که زمان استمرار^۱ که یکی از مشخصه‌های سیگنال انفجاری محسوب می‌شود در مورد این سه فلز با یکدیگر متفاوت است.

در جدول (۱) مقادیر زمان استمرار بر حسب میلی‌ثانیه برای مس، آلومینیم و فولاد زنگ نزن با یکدیگر مقایسه شده است. مشخص است که زمان استمرار مس نسبت به دو فلز دیگر بسیار کمتر است.

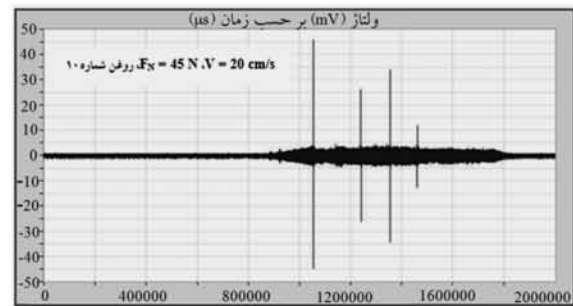
جدول (۱) مقایسه میانگین استمرار موج ورق مسی با آلومینیم و فولاد

$$\text{زنگ نزن } (F_N = 45 \text{ N}, v = 20 \text{ cm/s})$$

جنس	میانگین استمرار موج در ۹ مسیر حرکت حلقه
Cu (۹۹/۹)	۱/۲
Al ۱۰۰۰	۱۹۰
SS ۳۰۴	۱۲۱

از نتایج شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان این‌طور استنباط کرد که در طی ۴۰ cm مسافت لغزش تحت نیروی کم (۴۵ نیوتن) امواج نشر آکوستیک منحصراً در اثر برخورد برجستگی‌های میکروسکوپی مربوط به هر دو سطح حلقه و ورق مسی و تغییر شکل پلاستیک این برجستگی‌ها در سطح ورق مسی تولید شده است. این موضوع در کار سایر محققین نیز گزارش شده است [۱].

شکل (۱۰) سیگنال نشر آکوستیک در آزمایش کشیده شدن حلقه روی ورق آلومینیم ۱۰۰۰ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برخلاف سیگنال مربوط به ورق مسی، شکل (۸)، با وجود نیروی کم، علاوه بر سیگنال پیوسته مربوط به تغییر شکل پلاستیک، قله‌های انفجاری بسیار بزرگ نیز دیده می‌شوند. مطابق آنچه که قبلاً گفته شد این قله‌ها مربوط به پدیده‌های لحظه‌ای مثل تشکیل جوش سرد و بریده شدن آن است. این رفتار شبیه رفتار فولاد زنگ نزن ۳۰۴ تحت بار زیاد است.



شکل (۱۰) شکل موج (ولتاژ- زمان) در آزمایش حلقه روی ورق آلومینیم.

پس از انجام آزمایش، سطح ورق آلومینیومی و حلقه مورد بررسی قرار گرفت که آثار جوش سرد بر هر دو سطح ملاحظه شد. مقداری آلومینیم از سطح ورق جدا شده و به سطح حلقه چسبیده بود. در شکل (۱۱) تصاویر سطح ورق آلومینیومی و سطح حلقه پس از آزمایش نشان داده شده است.

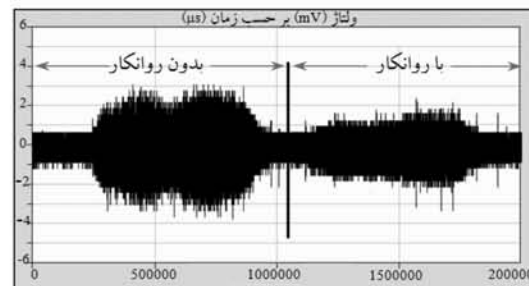


شکل (۱۱) تصویر سطح ورق (الف) و سطح حلقه (ب) پس از آزمایش تحت $F_N = 45 \text{ N}$ ، $v = 20 \text{ cm/s}$ ، روغن شماره ۱۰.

۱-Duration

تأثیر روانکار روی سیگنال نشر اکوستیک

برای بررسی تأثیر استفاده از روغن روانکار روی سیگنال اصطکاک، ابتدا بدون استفاده از روانکار حلقه روی ورق تحت نیروی عمودی ۱۲ نیوتن لغزنده شد و پس از ۱ ثانیه در محل لغزش حلقه روغن اضافه شد. در شکل (۱۳) تأثیر اضافه شدن روانکار روی سیگنال نشر اکوستیک در آزمایش روی ورق مسی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پس از افزودن روانکار دامنه سیگنال کاهش پیدا می‌کند. کاهش دامنه سیگنال می‌تواند به دلیل کاهش تعداد تماس برجستگی‌های میکروسکوپی در اثر قرار گرفتن فیلم روغن بین حلقه و ورق و میرا شدن سیگنال‌های نشر اکوستیک در حضور روغن باشد.



شکل (۱۳) دامنه سیگنال قبل (سمت چپ خط) و بعد از (سمت راست خط) افزودن روغن شماره ۱۰، سرعت لغزش حلقه ۲۰ سانتی متر بر ثانیه، نیروی عمودی ۱۲ نیوتن و جنس ورق: مس ۹۹/۹٪.

همین آزمایش به ترتیبی که ذکر آن رفت تحت نیروی عمودی زیاد نیز انجام گرفت. نتایج نشان داد که با اضافه شدن روغن تفاوت محسوسی در دامنه سیگنال ایجاد نمی‌شود. این امر را می‌توان به ناپایداری شدن قشر روانکار در نیروی عمودی زیاد نسبت داد.

۵- نتیجه گیری

این تحقیق برای شناسایی مکانیزم‌های اثرگذار در تولید سیگنال نشر اکوستیک در یک دستگاه شبیه سازی اصطکاک انجام شده است. با وجود اختلاف بین شرایط واقعی و شرایط شبیه سازی شده در این آزمایش، نتایج به دست آمده می‌تواند در ارزیابی توانایی روش نشر اکوستیک برای شناخت بهتر پدیده اصطکاک مورد استفاده قرار گیرد. نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان به شرح ذیل خلاصه کرد:

- ۱- سیگنال نشر اکوستیک در فرایند اصطکاک تحت تأثیر عوامل مختلفی مثل نیروی عمودی، جنس مواد و استفاده از روانکار قرار دارد و تغییر هر یک سبب تغییراتی در شکل موج سیگنال می‌شود.
- ۲- روش نشر اکوستیک در مقایسه با روش پایش اصطکاک حساسیت بیشتری در تشکیل خرابی در سطح از خود نشان می‌دهد.
- ۳- افزایش نیروی عمودی باعث افزایش توان سیگنال نشر اکوستیک می‌گردد ولی محدوده فرکانسی آنرا به طور محسوس تغییر نمی‌دهد.
- ۴- جنس فلز از جهات مختلف بر تولید سیگنال اصطکاک تأثیر می‌گذارد. هر چه حساسیت به تشکیل خرابی، که به دو عامل استحکام و هدایت حرارتی بستگی دارد، بیشتر شود توان سیگنال نشر بیشتر می‌شود. در فلزی که تمایل بیشتری به تشکیل جوش سرد از خود نشان می‌دهد سیگنال قوی‌تری ایجاد می‌شود. در مورد فولاد زنگ نزن، سیگنال‌های تولید شده در اثر جوش سرد بسیار قوی‌تر از سیگنال‌های مربوط به تغییر شکل پلاستیک ناشی از مالش سطح خارجی می‌باشد.
- ۵- حضور روانکار سبب می‌شود تا دامنه سیگنال نشر اکوستیک نسبت به اصطکاک خشک به طور محسوس کاهش پیدا کند. با این وجود، تحت نیروی‌های عمودی زیاد ممکن است فیلم روانکار ناپایدار شده و در نتیجه این کاهش ملاحظه نشود.

مراجع

- [1] Baranov V.M., Kudryavtsev E.M., Sarychev G.A. and Schavelin V.M., *Acoustic Emission in Friction*, 1st ed. London, Elsevier Pub., 2007.
- [2] *ASM Handbook, Vol. 17, Nondestructive Evaluation*, American Society for Testing and Materials (ASM International), 1994, pp. 661-702.
- [3] Jiaa C.L. and Dornfeld D.A., *Experimental Studies of Sliding Friction and Wear via Acoustic Emission Signal Analysis*, *Wear* 139, 1990, pp. 403-424.

- [14] Gaard, A., Krakhmalev P.V., Bergstrom, J. , Hallback N., *Galling resistance and wear mechanisms-cold work tool materials against carbon steel sheets*, Tribology Letters 26, 2007, 67-72.
- [15] Stachowiak G. ,Batchelor A., *Engineering Tribology*, 2th ed. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [4] Belyi V.A., Kholodilov O.V. ,Syirdylnik A.L., *Acoustic spectrometry as used for the evaluation of tribological systems*, Wear 69, 1981, pp. 309-319.
- [5] Diei E.N., *Investigation of the milling process using acoustic emission signal analysis*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California, Los Angeles, 1979.
- [6] Dornfeld D. A., *Acoustic emission monitoring and analysis of manufacturing processes*, 12th National Science Foundation Conf. On Production Research and Technology (May 1985), Presented at the proceedings, University of Wisconsin, Madison, WI, 1985, pp. 329-334.
- [7] Liang S.Y. , Dornfeld D.A., *Punch stretching processes monitoring using acoustic emission signal analysis, Part 1, Basic characteristics*, J. of Acoustic Emission 6(1), 1987, pp. 29-36.
- [8] Diei E.N. and Dornfeld D.A. *Acoustic emission sensing of tool wear in face milling*, J. Eng. Ind. 104, 1987, pp. 234-240.
- [9] Masaki T., *Use of acoustic emission for the study of wear*, S.B. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, MA, 1986.
- [10] Rangwala, S. and Dornfeld D.A., *Application of acoustic emission sensing to the analysis of contact between rough metallic surfaces*, ESRC Rep, 1988.
- [11] Lingard S., *An investigation of acoustic emission in sliding friction and wear of metals*, Wear 130, 1989, 367.
- [12] Hisakado, T. ,Warashina, T., *Relationship between friction and wear propertied and acoustic emission characteristics: iron pin on hardened bearing steel disk*, Wear 216, 1997, pp. 1-7.
- [13] Van der Heide E., Huis Veld A.J., *The effect of lubricant selection on galling in a model wear test*, Wear 251, 2001, 973-979.