

بررسی تجربی شکست در میل‌لنگ موتور دیزل سنگین تعمیر شده با فرآیند جوشکاری

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، شرکت راه آهن کشش، تهران، ایران

روح اله سرفراز
 محمد علی احترام*
 کشواد پورحسن

چکیده

در این مقاله فرآیند تعمیر یک میل‌لنگ سنگین مربوط به موتور لوکوموتیو، به روش جوشکاری و تأثیر آن بر شکست زود هنگام میل‌لنگ بررسی شده است. خرابی در محل اتصال محور لنگ تعمیر شده با لنگ افتاد است. بررسی سطح شکست بر اساس مشخصات ماکروسکوپی نشان می‌دهد مکانیزم حاکم در خرابی میل‌لنگ شکست خستگی است. جهت تشخیص تغییرات ریزساختاری، متالورژیکی و خواص مکانیکی ناشی از فرآیند تعمیر، از مقاطع سالم و تعمیر شده میل‌لنگ نمونه برداری و بر روی آنها آزمون‌های کوانتومتری، متالوگرافی، مکانیکی و سختی‌سنجی انجام شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از دو مقطع بررسی شده، تأثیر قابل توجه فرآیند تعمیر در تغییر ریز ساختارها و افزایش سختی در سطح مقطع تعمیر شده را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد تغییرات صورت گرفته در ریز ساختار و افزایش قابل توجه سختی بر روی لایه سطحی به همراه تمرکز تنش بالا در محل شکست موجب خرابی زود هنگام میل‌لنگ پس از تعمیر شده است.

واژه‌های کلیدی: میل‌لنگ، جوشکاری، تحلیل خرابی، ریزساختار، سختی.

Experimental failure analysis of a reconditioned heavy crankshaft by welding process

R. Sarfaraz

Mechanical and Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University A.C., Tehran, Iran

M. A. Ehteram

Mechanical and Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University A.C., Tehran, Iran

K. Pourhasan

Rahahan Keshesh Company, Tehran, Iran

Abstract

The reconditioning of a diesel-engine crankshaft by welding process and its influence on premature failure of the crankshaft was experimentally investigated. The fracture occurred between the web and the first crankpin where a repair welding process was previously carried out on the crankpin. Macroscopic features of the fracture surface indicated that fatigue damage was the governing failure mechanism. The chemical composition, mechanical properties, hardness, and microstructure of the crankshaft material at two locations, the fractured region and an intact section, were determined. Comparison of the results revealed a substantial difference between the repaired and sound sections. The premature failure of the crankshaft was attributed to an uncontrolled change in microstructure of the repaired section assisted by a high level of stress concentration.

Keywords: Crankshaft, welding, failure analysis, microstructure, hardness.

کوچک عامل ایجاد شکست شده است. از دیدگاه او تخریب میل‌لنگ‌ها به دلیل آسیب‌هایی است که در یک یا چند محور لنگ اتفاق می‌افتد که این اشکال می‌تواند مربوط به عملکرد موتور، نیروهای مکانیکی و عملیات تعمیر باشد. اختلال در عملکرد موتور شامل فقدان روغن، روان‌کاری ناقص بین ژورنال‌ها، دمای کاری بالای روغن و استفاده نادرست از موتور می‌باشد.

پانده [۲] یک تحلیل خرابی بر روی میل‌لنگ موتور دیزل تراکتور انجام داد. در این تحلیل، او این میل‌لنگ را که از ناحیه‌ی لنگ آسیب دیده بود را بررسی کرده و علت شکست را خستگی تشخیص داد. او مراحل شامل تعیین ترکیب شیمیایی و ریزساختار ماده میل‌لنگ، ارزیابی خواص مکانیکی ماده مورد استفاده، بررسی چشمی از ناحیه شکست، تخمین نقطه شروع و انتشار ترک خستگی، و مطالعه مکانیزم خستگی بوسیله میکروسکوپ الکترونی را برای تحلیل میل‌لنگ انجام داد. همچنین او دریافت که محل شروع ترک ناحیه‌ی بین لنگ و سطح محور لنگ بوده است.

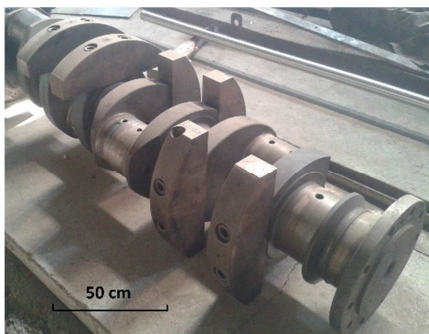
اسپادفور و همکارانش [۳] خرابی میل‌لنگ یک موتور دیزل ژنراتور

۱- مقدمه

یکی از مهمترین، گران‌قیمت‌ترین و پیچیده‌ترین قطعات مکانیکی موتور از نظر طراحی، ساخت و تحلیل میل‌لنگ می‌باشد. این محور تحت تنش‌های پیچشی و برشی، فشار، سایش و حرارت قرار دارد و در چنین شرایطی گشتاور موتور را منتقل می‌نماید. یکی از خرابی‌های رایج میل‌لنگ‌ها سایش و یا شکستگی کامل بدلیل از بین رفتن لایه روغن در ژورنال‌ها است. تعمیر میل‌لنگ‌ها به خصوص برای موتورهای دیزل با توجه به قیمت زیاد آن در شرایط خاصی قابل انجام و مقرون به صرفه است.

معمولاً میل‌لنگ‌ها بعد از تعمیر (سنگ‌زنی و سرهم کردن مجدد) در ساعت کاری کمتری از قبل دچار شکست می‌شوند. سیلوا [۱] تحقیقی روی میل‌لنگ یک ون دیزل انجام داده است. این میل‌لنگ بعد از طی ۳۰۰ هزار کیلومتر آسیب دیده و برای سنگ زنی ارسال شده بود. بعد از سنگ زنی و مونتاژ مجدداً بعد از طی ۱۰۰۰ کیلومتر آسیب دید. تحقیقات انجام شده نشان داد که سنگ زنی غلط و وجود ترک‌های

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m_ehteram@sbu.ac.ir



شکل ۱- نمایی از میل‌لنگ دیزل مورد مطالعه

بررسی تاریخچه کارکرد نشان می‌دهد که این میل‌لنگ پس از حدود ۱۵۰۰۰ ساعت کارکرد با دور موتور متوسط ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به علت اختلال در روان‌کاری در محل محور لنگ شماره ۱ به صورت سطحی تخریب شده و به روش جوشکاری و سپس سنگ زنی مورد تعمیر قرار گرفته است. پس از تعمیر، موتور دوباره در سرویس قرار گرفته ولی در فاصله زمانی کوتاهی (در حدود ۱۰۰۰ ساعت با دور موتور متوسط ۱۰۰۰ دور بر دقیقه)، در محل اتصال محور لنگ تعمیر شده (محور لنگ شماره ۱) با لنگ، دچار شکست شده است. شکل ۲ سطح شکست در محل اتصال محور لنگ شماره ۱ با لنگ مجاور را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سطح شکست در محل اتصال محور لنگ به لنگ بر روی محور لنگ

ترک از محل اتصال محور لنگ به لنگ آغاز شده، عمود بر محور لنگ رشد کرده و در فاز نهایی شکست بخشی از لنگ را نیز جدا کرده است. در شکل ۳ سطح شکست مقابل شکل ۱ بر روی لنگ نشان داده شده است. بررسی سطح شکست در شکل ۳ وجود خطوط ساحلی و پیشروی ترک در سطح مقطع را نشان می‌دهد به طوری که این ناحیه بیش از ۷۰ درصد از سطح مقطع قبل از شکست نهایی را شامل شده است. نقاط جوانه زنی ترک بر روی سطح محور لنگ مطابق با این شکل با توجه به چگونگی توسعه خطوط ساحلی بیضی شکل قابل تشخیص است. همچنین با مقایسه فاصله بین خطوط ساحلی می‌توان افزایش فاصله بین آنها با پیشروی ترک که نشان دهنده افزایش سرعت رشد ترک با افزایش طول ترک است را مشاهده کرد. مشاهدات انجام شده نشان می‌دهد سطح شکست مورد بررسی با سطوح شکست نوعی

را که ۲۰۰۰۰ ساعت کار کرده بود را بررسی کردند. شکست در دومین لنگ بین لنگ و محور لنگ رخ داده بود. آنها در مرحله اول مشخصات مکانیکی و سختی سطح را ارزیابی کردند. در سطح شکست یک ناحیه-ی باریک و خیلی سخت نزدیک محل شروع شکست مشاهده کردند که به نظر آنها منشاء شروع خرابی بود. تحلیل المان محدود میل‌لنگ نیز بر اساس بیشینه تنش ناحیه شکست را مطابق با ناحیه‌ی شکست مشاهده شده پیش‌بینی کرد.

گواگ لیانو و همکارانش [۴] تمرکز تنش ناشی از خمش را در میل‌لنگ یک دیزل دریایی بررسی کردند. آنها با نصب کرنش سنج نزدیک فیلت محل اتصال لنگ به محور لنگ میزان تمرکز تنش را اندازه‌گیری و با نتایج تحلیل اجزای محدود سه بعدی مقایسه کردند. همچنین برای کاهش پیچیدگی مدل‌سازی، نتایج مدل دو بعدی را با تحلیل سه بعدی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که ضریب تمرکز تنش بدست آمده در حالت دو بعدی و سه بعدی به هم نزدیک بود.

در مطالعه دیگری شکست میل‌لنگ یک کامیون توسط زو و همکاران [۵] بررسی شده است. آنها یک موتور دیزلی را که میل‌لنگ آن بعد از ۷۶ هزار کیلومتر کارکرد، شکسته بود بررسی کردند. خرابی در محور لنگ اول رخ داده بود و ۴۵ درجه با محور میل‌لنگ زاویه داشت. مکانیزم اصلی شکست خستگی تشخیص داده شد. بر اساس بررسی انجام شده، سخت کاری در فیلت کافی نبوده و با وجود انجام فرایند رولینگ، عمق لایه سخت شده برای ایجاد تنش فشاری لازم کافی نبوده است. همچنین وجود شبکه‌های فریتی در رشد ترک مؤثر بوده است.

علی‌رغم اهمیت تعمیر میل‌لنگ‌های سنگین و نیز تحقیقات مختلفی که تاکنون بر روی تحلیل خرابی موتورهای انجام شده است، متأسفانه تحقیقی در مورد تحلیل شکست ناشی از تعمیر اشتباه میل‌لنگ با استفاده از جوشکاری گزارش نشده است. در این تحقیق به بررسی شکست میل‌لنگ یک لوکوموتیو باری پرداخته می‌شود. به دلیل قیمت بالای این نوع میل‌لنگ سنگین، همواره انجام تعمیرات بر روی آن مورد علاقه بوده است ولی عدم وجود دانش کافی در مورد مجموعه عواملی که فرآیند تعمیر را با شکست مواجه می‌کند باعث کاهش کارایی و اطمینان برای انجام تعمیرات شده است. در این پژوهش به منظور تعیین استاندارد ماده و تشخیص تغییرات ریزساختاری و متالورژیکی از میل‌لنگ مورد مطالعه از دو ناحیه سالم و شکسته شده میل‌لنگ نمونه‌برداری شده و آزمون‌های تعیین خواص شیمیایی و مکانیکی اعم از کشش، ضربه و سختی‌سنجی بر روی آنها انجام گردیده است. با بهره‌گیری از اطلاعات بدست آمده از آزمون‌های مختلف، علت خرابی زود هنگام این میل‌لنگ سنگین مورد بررسی قرار می‌گیرد و بر این اساس پیشنهادهایی برای بهبود انجام فرآیندهایی از این نوع ارابه می‌گردد.

۲- مشخصات میل‌لنگ و شرح شکست آن

میل‌لنگ مورد بررسی مربوط به یک موتور دیزل ۴ زمانه-۱۶ سیلندر با توان ۵۰۰۰ اسب بخار است (شکل ۱).

جدول ۲- ترکیب شیمیایی بدست آمده از مقطع شماره ۲

C	Si	Mn	P	S	Cr
۰٫۴۲	۰٫۲۲	۰٫۶۲	۰٫۰۱۵	۰٫۰۰۳	۱٫۱
Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
۰٫۲۰	۰٫۱۳	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۱۴	۰٫۰۰۳
Ti	V	W	Pb	Sn	B
۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۸	<۰٫۰۱۵	<۰٫۰۱	۰٫۰۱	<۰٫۰۰۰۸
Zr	Bi	As	Fe		
۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰۴	Base		

با مطابقت نتایج آزمون کوانتومتری با استاندارد BS-EN10250-3(2000) مشخص گردید جنس فلز پایه در هر دو مقطع ASME-SA-29 Grade 4140 معادل در استاندارد Sec.II-Part A می‌باشد و تفاوتی از لحاظ ترکیب شیمیایی بین فلز پایه در دو مقطع وجود ندارد. آزمون‌های کشش و ضربه در دمای محیط نیز به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM E23 و ASTM A370 (2016) (2016) برای هر دو مقطع انجام شد. نتایج بدست آمده در جدول‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است.

ناشی از خستگی که شامل نقطه جوانه زنی، ناحیه رشد کند ترک با خطوط ساحلی و ناحیه رشد سریع ترک می‌شود مطابقت دارد و مکانیزم حاکم بر شکست در این میل‌لنگ خستگی بوده است.



شکل ۳- سطح شکست در محل اتصال محور لنگ به لنگ بر روی لنگ

۳- نتایج تجربی و بحث بر روی نتایج

۳-۱- روش بررسی و نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده

برای بررسی علت شکست دو مقطع از میل‌لنگ یکی در محل شکست و دیگری در فاصله دورتر از محل تعمیر شده در نظر گرفته شد. برای تعیین ترکیب شیمیایی فلز پایه میل‌لنگ و خواص مکانیکی آن و نیز اطمینان از یکسان بودن این خواص در دو مقطع مورد بررسی، دو نمونه آزمایشگاهی یکی از بخش سالم و بدون شکست تحت عنوان "مقطع شماره ۱" و دیگری از بخش شکسته شده میل‌لنگ - که مورد تعمیر نیز قرار گرفته است - با نام "مقطع شماره ۲" تهیه و آماده سازی گردید. آزمون‌های تعیین ترکیب شیمیایی، کشش و ضربه بر روی نمونه‌های آماده شده از هر دو مقطع انجام شد. سپس دو نمونه از مقاطع مذکور، با کدهای "الف" از بخش سالم و "ب" از بخش شکسته شدهی میل‌لنگ جهت ماکروگرافی، متالوگرافی و سختی‌سنجی تهیه گردید. در بخش‌های بعد نتایج بدست آمده از آزمون‌های انجام شده ارایه و مقایسه می‌شوند.

۳-۲- آزمون‌های تعیین ترکیب شیمیایی، کشش و ضربه

این آزمون‌ها برای تعیین ترکیب شیمیایی میل‌لنگ و خواص مکانیکی آن در دو مقطع مورد بررسی انجام گردید. آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش اسپکترومتری نشری بر اساس استاندارد مرجع ASTM E415-15 انجام شد. نتایج بدست آمده در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج آزمون کشش در مقطع شماره ۱

نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۱	
۴٫۱۳	۴٫۰۷	قطر نمونه (میلیمتر)
۱۳٫۴۰	۱۳٫۰۱	سطح مقطع (میلیمتر مربع)
۱۶	۱۶	طول گیج (میلیمتر)
۷۳۱	۶۷۵	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)
۹۵۱	۹۰۳	استحکام نهایی (مگاپاسکال)
۱۸	۱۸	ازدیاد طول نسبی (%)
۶۰	۵۹	کاهش سطح مقطع (%)

جدول ۴- نتایج آزمون ضربه در مقطع شماره ۱

نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۱	
		۱۰*۱۰*۵۵	ابعاد نمونه (میلیمتر)
۳۰	۲۷	۲۷	انرژی ضربه (ژول)
		۲۸	میانگین انرژی ضربه (ژول)
جدا شده	جدا شده	جدا شده	نتیجه
محیط	محیط	محیط	دمای آزمون

جدول ۵- نتایج آزمون کشش در مقطع شماره ۲

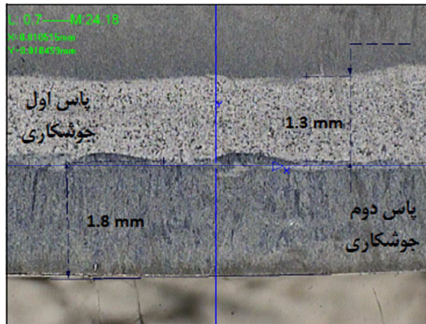
نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۱	
۶٫۳۲	۶٫۱۲	قطر نمونه (میلیمتر)
۳۱٫۳۷	۲۹٫۴۲	سطح مقطع (میلیمتر مربع)
۲۵	۲۵	طول گیج (میلیمتر)
۷۰۸	۷۴۰	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)
۸۹۸	۹۳۳	استحکام نهایی (مگاپاسکال)
۱۸	۱۶	ازدیاد طول نسبی (%)
۵۸	۵۸	کاهش سطح مقطع (%)

جدول ۱- ترکیب شیمیایی بدست آمده از مقطع شماره ۱

C	Si	Mn	P	S	Cr
۰٫۴۲	۰٫۲۲	۰٫۶۳	۰٫۰۱۹	۰٫۰۰۳	۱٫۱۱
Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
۰٫۲۰	۰٫۱۳	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱	۰٫۱۴	۰٫۰۰۴
Ti	V	W	Pb	Sn	B
۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۸	<۰٫۰۱۵	<۰٫۰۱	۰٫۰۰۶	<۰٫۰۰۰۸
Ca	Zr	Bi	As	Fe	
Trace	۰٫۰۱	۰٫۰۰۶	۰٫۰۱	Base	

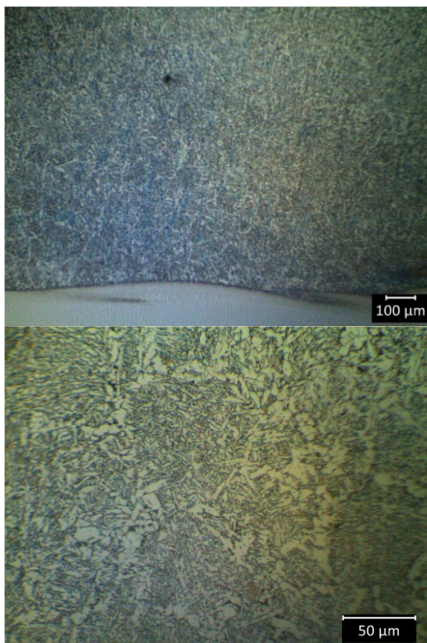
شود، نشان می‌دهد که نمونه به صورت تک لایه و فاقد لایه سطحی می‌باشد.

آماده سازی نمونه‌های متالوگرافی (شکل ۵) برای نمونه "ب" بر اساس استاندارد ASTM E3-11 و میکرواچ بر اساس استاندارد ASTM E407-07 انجام گرفت. شکل ۶ تصویر میکروسکوپی نمونه "ب" بعد از اچ را نشان می‌دهد. این تصویر تغییرات ریزساختاری ناشی از تعمیرات در نمونه "ب" در دو لایه جوش به ضخامت‌های تقریبی ۱٫۳ میلی‌متر برای پاس اول و ۱٫۸ میلی‌متر برای پاس دوم جوشکاری بر روی سطح این نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی از نمونه "ب" بعد از اچ. محلول اچ: Vilella

بررسی تصاویر متالوگرافی بدست آمده در شکل ۷ از پاس اول جوش (لایه اول با ضخامت حدودی ۱٫۳ میلی‌متر) با ریزساختار فریتی-پرلیتی، نشان می‌دهد فیلر مورد استفاده جهت جوشکاری از نوع ساده کربنی بوده است.



شکل ۷- ساختار فریتی پرلیتی به همراه فریت‌های سوزنی در پاس اول جوش (بزرگنمایی ۱۰۰ و ۵۰۰).

آنالیز شیمیایی پاس اول جوش که از نمونه "ب" بر اساس

جدول ۶- نتایج آزمون ضربه در مقطع شماره ۲

نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۱	
۱۰*۱۰*۵۵			ابعاد نمونه (میلی‌متر)
۲۸	۲۶	۳۹	انرژی ضربه (ژول)
۲۸			میانگین انرژی ضربه (ژول)
جدا شده	جدا شده	جدا شده	نتیجه
محیط	محیط	محیط	دمای آزمون

مقایسه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد تفاوتی از لحاظ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فلز پایه در دو مقطع مورد بررسی وجود ندارد. به عبارتی تعمیرات انجام شده سطحی بوده و تاثیری بر خواص شیمیایی و مکانیکی در عمق ماده نگذاشته است.

۳-۳- ماکروگرافی و آزمون‌های متالوگرافی

به علت عدم وجود اطلاعات دقیق از فرآیند جوشکاری و برای شناخت تعداد پاس‌های جوشکاری شده بر روی سطح و نیز تفاوت‌های حاصله شده از فرآیند تعمیر دو نمونه "الف" و "ب" به ترتیب مربوط به بخش سالم و بخش شکسته شده آماده سازی گردید.

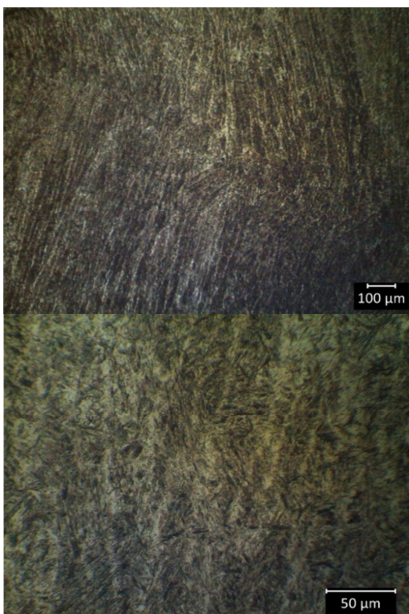


شکل ۴- تصویر میکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده نمونه "الف". محلول اچ: نایتال ۱۰٪



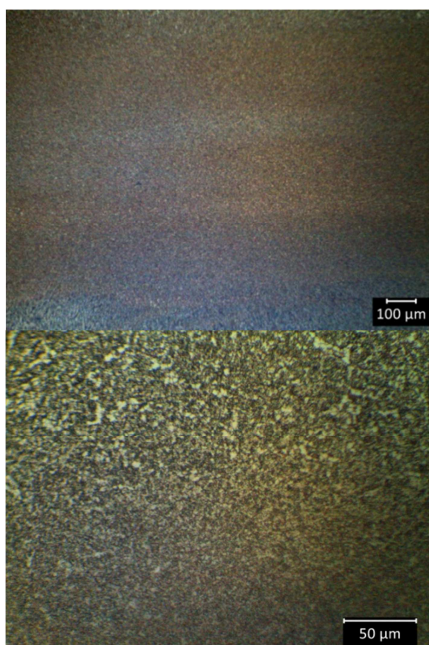
شکل ۵- تصویر میکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده نمونه "ب"

ماکروگرافی برای نمونه "الف" بر اساس استاندارد ASTM E 381-06 انجام گرفت. مشاهدات انجام شده بر روی نمونه ماکروگرافی آماده سازی شده در مقطع مورد بررسی، چنانچه در شکل ۴ مشاهده می-



شکل ۹- ساختار مارتنزیت تمپر شده در پاس دوم جوش (بزرگنمایی ۱۰۰ و ۵۰۰)

در بررسی دقیق‌تر تصاویر متالوگرافی، منطقه متأثر از گرما (HAZ) بین پاس اول جوش و فلز پایه نیز تشخیص داده شد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تصاویر متالوگرافی منطقه متأثر از گرما و فلز پایه نمایش داده شده است. در هر دو نمونه ساختار مارتنزیت تمپر شده- بینیتی مشاهده می‌شود. با این حال مقایسه این شکل‌ها نشان می‌دهد که ریزساختار ناحیه متأثر از گرما در مقایسه با ریزساختار فلز پایه از پایداری و یکنواختی بیشتری برخوردار است.



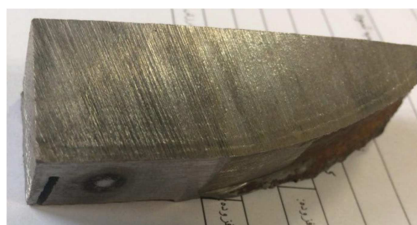
شکل ۱۰- ساختار مارتنزیت تمپر شده-بینیتی در ناحیه متأثر از گرما (بزرگنمایی ۱۰۰ و ۵۰۰)

استاندارد ASTM E415-15 استخراج گردیده در جدول ۷ ارائه شده است. برای تعیین ترکیب شیمیایی پاس اول جوش، با توجه به تصاویر ماکروگرافی، سطح نمونه شماره ۲ در حدود ۲ میلیمتر سنگ زنی و آنالیز شیمیایی از مقطع سنگ زنی شده استخراج گردید. نتایج بدست آمده از آنالیز شیمیایی با نوع فیلر تشخیص داده شده بر اساس تصاویر متالوگرافی مطابقت دارد.

جدول ۷- ترکیب شیمیایی بدست آمده از پاس اول جوش

C	Si	Mn	P	S	Cr
۰٫۹۶	۰٫۷۴	۱٫۵۹	۰٫۰۳۹	۰٫۲۱	۰٫۱۱
Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱۹	۰٫۰۰۵	۰٫۰۸	۰٫۰۰۸
Ti	V	W	Pb	Sn	B
۱٫۰۰۶	۰٫۰۰۲	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۰۰۸
.	<	<	<	.	<
Ca	Zr	Bi	As	Fe	
Trac	۰٫۰۱	<۰٫۰۱	۰٫۰۰۹	Base	
e					

برای تعیین ترکیب شیمیایی پاس دوم جوش (لایه دوم با ضخامت حدودی ۱/۸ میلیمتر) سطح نمونه "ب" با یک سنگ زنی نرم همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود آماده کوانتومتری گردید.



شکل ۸- محل انجام کوانتومتری از سطح نمونه "ب"

ترکیب شیمیایی بدست آمده در جدول ۸ آلیاژی بودن فیلر مورد استفاده در پاس دوم جوش را نشان می‌دهد که با ریزساختار به دست آمده از این لایه مطابق شکل ۹ همخوانی دارد. تصاویر متالوگرافی در شکل ۹ پاس دوم جوش با ساختار مارتنزیت تمپر شده را نشان می‌دهد.

جدول ۸- ترکیب شیمیایی بدست آمده از مقطع شماره ۲

C	Si	Mn	P	S	Cr
۰٫۱۴	۰٫۶۹	۱٫۴	۰٫۰۲۹	۰٫۰۱۳	۰٫۲۷
Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۱۶	۰٫۰۰۶	۰٫۱۲	۰٫۰۰۵
Ti	V	W	Pb	Sn	B
۰٫۰۰۳	<۰٫۰۰۲	<۰٫۰۱۵	<۰٫۰۱	۰٫۰۱	<۰٫۰۰۰۸
Zr	Bi	As	Fe		
۰٫۰۰۷	<۰٫۰۱	۰٫۰۰۴	Base		

جدول ۹- نتایج سختیسنجی از سطح تا عمق برای نمونه "الف"

موقعیت سختیسنجی (فاصله از سطح)	عدد سختی (HV)		
	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳
۰٫۲ میلیمتر	۳۱۹	۳۱۷	۳۱۹
۱ میلیمتر	۳۰۶	۳۰۹	۳۱۲
۲ میلیمتر	۳۰۲	۳۰۴	۳۰۴
۳ میلیمتر	۳۱۲	۳۰۹	۳۰۹
۱۵ میلیمتر	۲۹۷	۲۹۹	۲۹۹

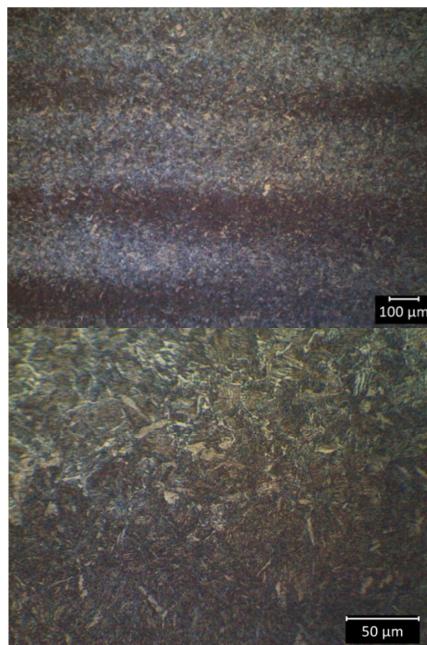
نتایج بدست آمده در جدول ۹ تغییرات جزئی اعداد سختی در نمونه "الف" را نشان می‌دهد. این نتایج با یکنواختی ریزساختار ماکروسکوپی مشاهده شده در شکل ۳ تطابق دارد.

برای نمونه "ب" نیز سختیسنجی مطابق با استاندارد مذکور انجام و نتایج در جدول ۱۰ ارائه شده است. با توجه به وجود دو لایه مختلف جوش بر روی سطح، برای استخراج پروفیل سختی، اندازه‌گیری در تمامی لایه‌ها انجام گردید. موقعیت شماتیک نقاط سختیسنجی بر روی نمونه "ب" در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۰- نتایج سختیسنجی از سطح تا عمق برای نمونه "ب"

موقعیت سختیسنجی (فاصله از سطح)	عدد سختی (HV)		
	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳
پاس دوم جوش_ نزدیک به سطح (۰٫۲ میلیمتر)	۴۹۳	۵۴۲	۵۳۰
پاس دوم جوش_ دورتر از سطح (۱٫۵ میلیمتر)	۵۴۲	۵۵۴	۵۵۲
پاس اول جوش (۲٫۵ میلیمتر)	۲۴۵	۲۲۶	۲۴۳
عمق نمونه/فلز پایه (۱۵ میلیمتر)	۲۷۴	۲۷۰	۲۶۸

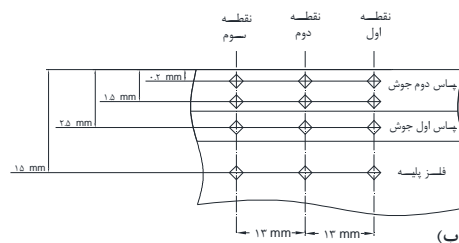
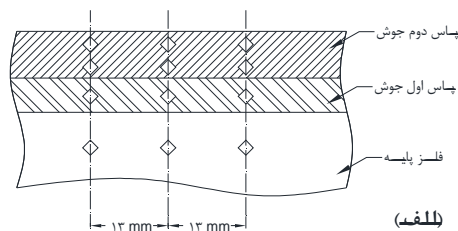
در نمونه "ب" بیشترین اعداد سختی مربوط به پاس دوم جوش است. اعداد سختی در نزدیکی سطح نمونه نسبت به اعداد سختی در عمق پاس دوم جوش مقادیر کمتری را نشان می‌دهد. نتایج تحقیقات انجام گرفته از مجری تعمیرات حاکی از آن است که پس از جوشکاری نهایی، عملیات حرارتی به صورت موضعی انجام شده است. بر این اساس دمای مقطع جوشکاری شده به حدود ۴۰۰-۴۵۰ درجه سلسیوس رسیده، سپس حرارت‌دهی قطع شده و با عایق کاری سطح، مقطع جوشکاری شده تا دمای محیط به آرامی سرد شده است. از این-رو کاهش سختی در سطح می‌تواند با انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری قابل توجیه باشد، زیرا محدوده دمایی مورد استفاده در عملیات حرارتی نقش موثری در تنش‌زدایی سطح جوشکاری شده دارد. مقایسه تغییرات سختی در نمونه‌های "الف" و "ب" در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که تعمیرات انجام شده با فرآیند جوشکاری میزان سختی را در سطح نمونه "ب" بیش از ۶۰ درصد افزایش داده است. این تغییرات سختی، باعث افزایش حساسیت ساختار نسبت به رشد ترک خستگی به عنوان مکانیزم حاکم در شکست در میل‌لنگ مورد بررسی شده است.



شکل ۱۱- ساختار مارتنزیت تمپیر شده-بینیتی در فلز پایه (بزرگنمایی ۱۰۰ و ۵۰۰)

۳-۴- آزمون سختیسنجی

جهت بررسی تغییرات سختی احتمالی ایجاد شده در اثر فرآیند تعمیرات، آزمون سختیسنجی ماکرو به روش ویکرز بر اساس استاندارد ISO 6507-1(2005) بر روی نمونه‌های "الف" و "ب" انجام گردید. موقعیت نقاط سختیسنجی شده در نمونه "ب" در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج سختیسنجی از سطح تا عمق قطعه برای نمونه "الف" در جدول ۹ گزارش شده است. مطابق استاندارد در هر فاصله از سطح سه اندازه‌گیری انجام شده است.



شکل ۱۲- (الف) تصویری شماتیک از فلز پایه و پاسهای جوش در نمونه "ب" و نقاط سختیسنجی شده، (ب) موقعیت نقاط سختی-سنجی نسبت به سطح نمونه

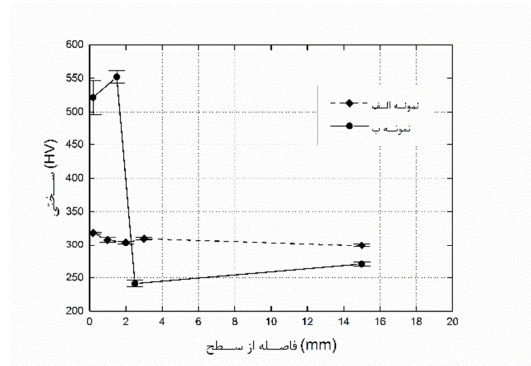
همراه سطح بالای تنش در محل اتصال محور لنگ به لنگ زمینه را برای رشد سریع ترک خستگی و شکست زود هنگام میل لنگ پس از تعمیر فراهم کرده است. اگر چه افزایش سختی بر روی سطح باعث تعویق جوانه زنی می شود اما ترک های ریز سطحی که ممکن است طی فرآیند سنگ زنی ایجاد شوند مزیت ایجاد شده را از بین می برد. از این رو در مواردی که تعمیرات اصلاحی بر روی سطوح محور اصلی و محور لنگ مقرون به صرفه است توجه ویژه به دستورالعمل جوشکاری جهت کنترل ریزساختار و سایر خواص مکانیکی و نیز انجام تست های لازم برای تایید این دستورالعمل بسیار ضروری است. در دستورالعمل جوشکاری تعیین نوع فیلر مورد استفاده، دماهای پیش گرم و عملیات حرارتی پس از جوشکاری بسیار حایز اهمیت است. همچنین انجام عملیات سنگ زنی به صورت کنترل شده جهت کاهش احتمال ایجاد ترک در اثر گرمای موضعی ایجاد شده و بازرسی غیرمخرب پس از سنگ زنی بسیار ضروری است. در رابطه با میل لنگ مورد بررسی، تغییرات لازم جهت بهبود فرآیند تعمیر در قالب یک دستورالعمل جوشکاری جدید و نیز پیشنهاداتی در رابطه با انجام بازرسی های غیر-مخرب به مجری تعمیرات پیشنهاد گردید.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت راه آهن کشش بابت حمایت از این پژوهش در چهارچوب قرارداد شماره ۱۳۸۵/ص ۹۵ به ویژه آقای مهندس جواد طاهر افشار که مساعدت های فراوانی برای دسترسی به اطلاعات لازم را فراهم نمودند اعلام می دارند.

۶- مراجع

- [1] Silva F. S., Analysis of a vehicle crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, No.5, pp. 605-616, 2003.
- [2] Pandey R. K., Failure of diesel-engine crankshafts. *Engineering failure analysis*, Vol. 10, No. 2, pp. 165-175, 2003.
- [3] Jiménez Espadafor F., Becerra Villanueva J., and Torres García M., Analysis of a diesel generator crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No.7, pp. 2333-2341, 2009.
- [4] Guagliano M., Terranova A., and Vergani L., Theoretical and experimental study of the stress concentration factor in diesel engine crankshafts. *Journal of mechanical design*, Vol. 115, No.1, pp. 47-52, 1993.
- [5] Xu, X., Yu, Z. & Yang, Z., Truck Diesel Engine Crankshaft Failure Analysis. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 11, No.1, pp. 51-55, 2011.
- [6] Escobar J. A., *Stress and fatigue analysis of SVI-tested camshaft lobes*, MSc. thesis, Virginia Pol. Inst., 1996.



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات سختی از سطح تا عمق قطعات برای نمونه های "الف" و "ب"

اگر چه افزایش سختی بر روی سطح می تواند به عنوان یک عامل موثر در بهبود رفتار ماده در به تاخیر انداختن جوانه زنی ترک قلمداد شود اما وجود ترک بسیار کوچک سطحی که ممکن است در اثر فرآیندهایی نظیر سنگ زنی ایجاد شوند، نه تنها این اثر مثبت را از بین می برد بلکه باعث افزایش سرعت رشد ترک نیز می شود. در تحقیق انجام شده توسط اسکوبار [۶] در بررسی اثر سنگ زنی بر روی نوعی از میل بادامک، وی نشان داده است که فرآیند مذکور باعث ایجاد گرمای موضعی در محل سنگ زنی و ایجاد ترک های سطحی می شود. در میل-لنگ مورد بررسی نیز پس از فرآیند جوشکاری عملیات سنگ زنی انجام شده است که می تواند باعث ایجاد این گونه ترک های سطحی و در نتیجه تسریع خرابی آن شده باشد. به دلیل اینکه میل لنگ پس از شکست نهایی در اختیار تیم پژوهشی قرار گرفته بود امکان بررسی وجود چنین ترک هایی پس از عملیات سنگ زنی وجود نداشت.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش خرابی زود هنگام یک میل لنگ سنگین به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. سطح شکست میل لنگ تعمیر شده نشان می دهد که مکانیزم خرابی حاکم در میل لنگ مورد مطالعه شکست خستگی است ضمن اینکه جوانه زنی ترک از محل اتصال محور لنگ به لنگ در محل تعمیر شده اتفاق افتاده است. با مقایسه تغییرات ریزساختاری و پروفیل سختی نمونه های تعمیر شده و سالم می توان نتیجه گرفت که تعمیرات انجام شده با فرآیند جوشکاری، میزان سختی را در سطح قطعه تعمیر شده بیش از ۶۰ درصد نسبت به فلز پایه افزایش داده است که این تغییرات سختی، باعث افزایش حساسیت ساختار نسبت به رشد ترک خستگی شده است. این تغییر ساختار به