

تحلیل ریشه‌های خرابی چندراهه دود آب خنک موتور دیزل دریایی پرسرعت

سید وحید حسینی*؛ علی اکبر ثقفی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۶، ش ص: ۱۶-۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲)

چکیده

در موتورهای دیزل دریایی با نسبت توان به وزن بالا، چندراهه دود به صورت آب‌خنک طراحی و ساخته می‌شود تا ضمن افزایش عملکرد و ایمنی کابین شناور، نرخ انتقال حرارت از مجموعه اگزوز موتور افزایش یابد. در یکی از موتورهای دیزل دریایی پرسرعت پس از گذشت ۴۱۷ ساعت از کارکرد موتور، چندراهه دود آلومینومی آب‌خنک به علت ایجاد حفره در جداره بین راهگاه‌های دود و آب، دچار نشتی آب به داخل اتاق احتراق شده است. این پژوهش به بررسی علل خرابی این چندراهه دود می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که خفگی ناشی از جوشش باعث بوجود آمدن ترک اولیه حرارتی در چندراهه دود شده است. پدیده خفگی بدلیل بوجود آمدن حباب روی سطوح داغ و تشکیل لایه‌های بخار آب باعث کاهش انتقال حرارت سطح و افزایش موضعی دما در چندراهه دود شده است. این پدیده ناشی از کاهش سرعت سیال خنک‌کننده بدلیل وجود زائده‌های ریختگی و گاهی بسته شدن مسیر آب بوجود آمده است که با توجه به افزایش دمای چندراهه دود در فرایند ارتقا تشدید شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد اگرچه پدیده جوشش دلیل اصلی شروع ترک در چندراهه دود است، ولی رشد حفره‌ها در قطعه ریخته‌گری شده آلومینومی تحت یک مکانیزم الکتروشیمیایی صورت گرفته تا به مرور زمان باعث نشت سیال خنک‌کننده به داخل موتور شود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خرابی، ترک خوردگی، چندراهه دود، پدیده جوشش، موتور دیزل دریایی.

^۱ - استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۲ کارشناس ارشد مواد، شرکت توسعه قوای محرکه دینا

*- نویسنده مسئول مقاله: V_hosseini@shahroodut.ac.ir

پیشگفتار

امروزه با افزایش نیازمندی‌های حمل‌ونقل دریایی و نیاز به افزایش سرعت شناورها در دریا، موتورهای دیزل دریایی پرسرعت که دارای نسبت توان به وزن بالایی هستند، کاربرد زیادی در شناورهای تندرو دارند. در بسیاری از موتورهای دیزل دریایی، چندراهه دود^۱ به صورت آب خنک طراحی و ساخته می‌شود. چندراهه دود آب خنک از آنجایی که موتور در فضای محدود و بسته‌ای در موتورخانه شناور قرار دارد، از طرفی امکان کاهش فضای موتورخانه و از طرف دیگر باعث افزایش ایمنی شناور خواهد شد. با توجه به این‌که خنک‌کاری این‌گونه موتورها توسط آب شور دریا انجام می‌شود، محدودیتی در انتقال حرارت بوجود نیامده و چندراهه دود تحت دماهای پایین‌تری قرار می‌گیرد. آلیاژهای آلومینیوم با دارا بودن ضریب انتقال حرارت بالا، در صورتی که فرآیند خنک‌کاری صحیح طراحی شود، توزیع دما در چندراهه دود را متوازن‌تر می‌کنند و در نتیجه تنش‌های حرارتی کمتری به چندراهه دود اعمال می‌شود.

چندراهه‌های دود و سیستم‌های اگزوز مدرن باید در برابر تنشهای شدید مکانیکی و حرارتی چرخه‌ای مقاومت کنند. با توجه به افزایش بازده موتورها و در نتیجه افزایش دمای اگزوز، تنشهای وارد بر چندراهه دود افزایش می‌یابد و پژوهشهای زیادی در زمینه پیش‌بینی عمر مفید و کمینه‌سازی تنشهای حرارتی انجام شده است. علاوه بر این امروزه با استفاده از آزمونهای طولانی حرارتی، چندراهه‌های دود مورد صحت‌گذاری قرار می‌گیرند. مهران و همکاران [۱] مدلی ترمودینامیکی جهت پیش‌بینی دما در چندراهه دود پیشنهاد دادند که باعث کاهش زمان و هزینه‌ها می‌شد. این مدل با دریافت تاریخچه بارگذاری حرارتی، با استفاده از یک مدل ساختاری ویسکو پلاستیک تنشها در ماده را محاسبه می‌کند که با نتایج آزمون تجربی هم‌خوانی خوبی دارد. هم‌چنین ذیهر و همکاران [۲] در مطالعه‌ای برای شبیه‌سازی خستگی ترمومکانیکی از مدل ویسکو پلاستیک برای توصیف رفتار چندراهه‌های دود، سرسیلندر و پیستون‌های ساخته شده با مواد استاندارد مانند چدن و آلیاژهای آلومینیوم استفاده کردند. آنها با استفاده از شبیه

سازی اجزا محدود، رفتار عمر خستگی با وجود تنشهای مکانیکی-حرارتی را در قطعات موتور بررسی کردند. از طرفی عملکرد چندراهه دود تأثیر بسزایی در بازده موتور دارد و در پژوهشهایی با اصلاح طراحی هندسی چندراهه دود، راندمان موتور بهینه شده است. میلانویچ و همکاران [۳] با استفاده از روشهای دینامیک سیالات محاسباتی^۲ (CFD)، عملکرد مایع خنک کننده در چندراهه‌های دود آب خنک را در موتورهای دریایی را مطالعه کردند. آنها برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی، نتایج عددی CFD را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. در این مطالعه اثرات پارامترهای دور موتور، سرعت حرکت مایع خنک‌کننده، دمای ورودی مایع خنک‌کننده، دمای گازهای اگزوز و زبری سطح داخلی بر عملکرد چند راهه دود بررسی شد. گرسپوزسکی و همکاران [۴] روش جدیدی با استفاده از دینامیک گاز و دمای اگزوز برای ارزیابی کیفی و کمی شار آنتالپی و فشارهای پالسی خروجی از اگزوز موتور دریایی ارائه دادند. آنها دریافتند که دمای اگزوز که توسط نصب ترموکوپل اندازه‌گیری شده بود، اطلاعات تشخیصی مهمی در مورد وضعیت فنی کارکرد سیلندر موتور در اختیار کاربر قرار می‌دهد. برای بدست آوردن این اطلاعات، بایستی فناوری اندازه‌گیری و پردازش ریاضی سیگنال درجه حرارت گاز خروجی ضبط شده با سرعت بالا را به کار برد که امکان باز تولید تاریخچه واقعی حرارت گاز خروجی به عنوان عملکرد زاویه چرخش میل‌لنگ موتور را فراهم می‌کند.

علاوه بر این، در سیستم‌های خنک‌کننده چندراهه دود موتور دیزل دریایی هدف اصلی دستیابی به توزیع یکنواخت حرارتی است. طراحی هندسه منیفولد اگزوز بایستی به گونه‌ای باشد که انتقال حرارت را بهبود ببخشد و هم‌چنین از بروز ترک در نقاط بحرانی جلوگیری کند. آثاری و همکاران [۵] در تحقیقی دو پیکربندی جدید ارائه دادند که نشان داد پیکربندی تک کانال، با از بین بردن دیواره جداکننده خروجی در سمت گازهای گرم، توزیع دمای یکنواخت‌تری را در بدنه چند راهه دود ایجاد می‌کند. این کار باعث می‌شود حداکثر دمای بدنه تا ۳۶ درصد کاهش یابد تا بتوان خطر بروز ترکهای حرارتی را کنترل کرد. در ادامه این مقاله به بررسی علل مختلف

^۲Computational Fluid Dynamics (CFD)

^۱Exhaust Manifold

آب از چندراهه دود این موتور به داخل اتاق احتراق راه پیدا کرده است. اگر چه که در بعضی از موتورهای دریایی، چندراهه دود با استفاده از آب دریا خنک می‌شود، در موتور مذکور این قطعه توسط سیال خنک‌کننده موتور خنک‌کاری می‌شود. پس از انجام آزمون نشتی، به منظور یافتن مکان دقیق نشتی آب، برش چندراهه دود انجام شد. شکل ۱-الف موقعیت ناحیه نشتی که در بین راهگاه‌های دود سیلندر شماره ۳ موتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱-ب) دیواره بین گاز و سیال خنک‌کننده در

مسیر دود سیلندر شماره ۳

شکل ۱- تشکیل حفره در مسیر عبور آب در چندراهه دود موتور دیزل دریایی

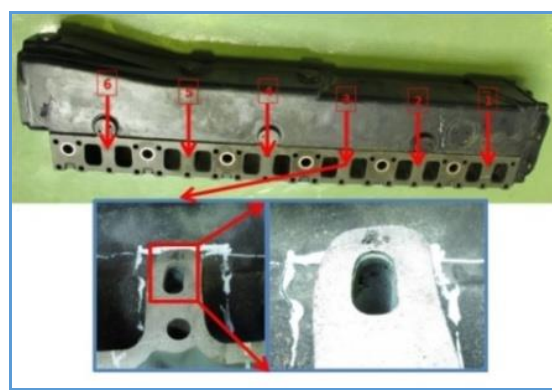
در نزدیکی راهگاه خروجی گاز به سیلندر کلکتور ایجاد شده است که در شکل ۱-ب نشان داده شده است. (۲) منطقه دوم مطابق با شکل ۲ دارای حفرات ریزی است و این حفرات هنوز باعث نشتی نشده است.

خرابی یک چندراهه دود آب خنک می‌پردازد تا با بررسی شواهد، در نهایت ریشه اصلی خرابی چندراهه دود موتور دیزل پرسرعت و سطح حساسیت آن مشخص شود.

مواد و روش‌ها

تاریخچه خرابی چندراهه دود

در یکی از موتورهای دریایی پرسرعت، بعد از گذشت ۴۱۷ ساعت از کارکرد موتور، به علت نشت آب به داخل سیلندر موتور و اختلاط آب با روغن، دچار خرابی و متوقف می‌شود. پس از بررسی‌های اولیه مشخص شد که

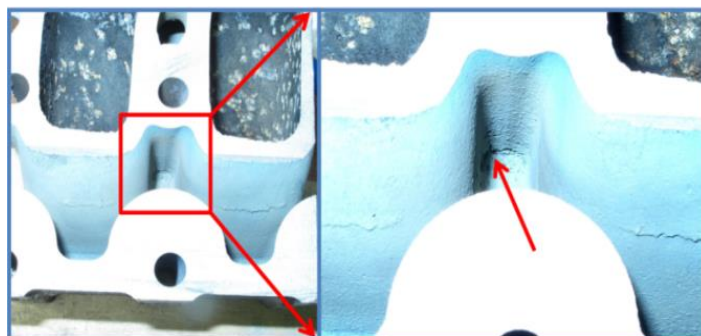


شکل ۱-الف) محل حفره در چندراهه دود

موتور دیزل دریایی

بر اساس مشاهدات چشمی بعد از برش چندراهه دود، مشخص شد که چندراهه دود دارای حفره‌ها و ترک‌هایی در دو منطقه است.

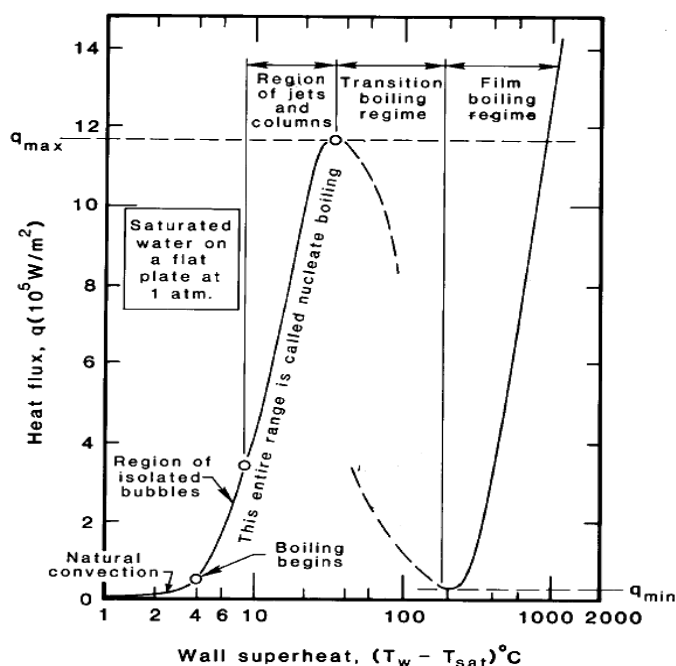
(۱) منطقه اول بحرانی شامل حفره‌هایی در سیستم خنک‌کننده در محل دیواره بین سیال خنک‌کننده و دود اگزوز



شکل ۲- وجود حفرات ریز در مدار خنک‌کاری در راهگاه سیلندر شماره ۴

حفرات، ترکیدن حباب‌ها در سطح می‌باشد. در جوشش افزایش دما تا دمایی بالاتر از دمای تبخیر، موجب ایجاد حباب می‌شود [۶] که مکانیزم آن در ادامه به طور کامل شرح داده خواهد شد. برای پدیده جوشش، دیاگرام شار حرارتی بر حسب اختلاف دمایی دیواره با دمای اشباع مطابق با شکل ۳ تعریف می‌شود.

یکی از مکانیزم‌های تخریب سطوح داغ در تماس با سیال خنک‌کننده، پدیده جوشش می‌باشد. پدیده جوشش، شبیه کاویتاسیون با ایجاد حباب‌های هوا همراه است؛ اما دلیل تشکیل حباب در این دو پدیده متفاوت می‌باشد. در کاویتاسیون کاهش موضعی فشار هیدرودینامیک تا فشار بخار آب موجب ایجاد حباب هوا می‌شود و مکانیزم ایجاد



شکل ۳ - دیاگرام شار حرارتی بر حسب اختلاف دمایی سیال و دیواره در هنگام جوشش [۲]

غشای بخار، نقطه حد بحرانی انتقال حرارت^۲ گفته می‌شود [۸].

روش تحقیق

بعد از یافتن دلایل ایجاد ترک‌ها و حفرات در چندراهه دود، با تحقیق در منابع مختلف و برگزاری جلسات طوفان ذهنی، دلایل احتمالی خرابی برای نمونه مذکور در قالب نمودار استخوان ماهی^۳ مطابق با شکل ۴ بدست آمده است.

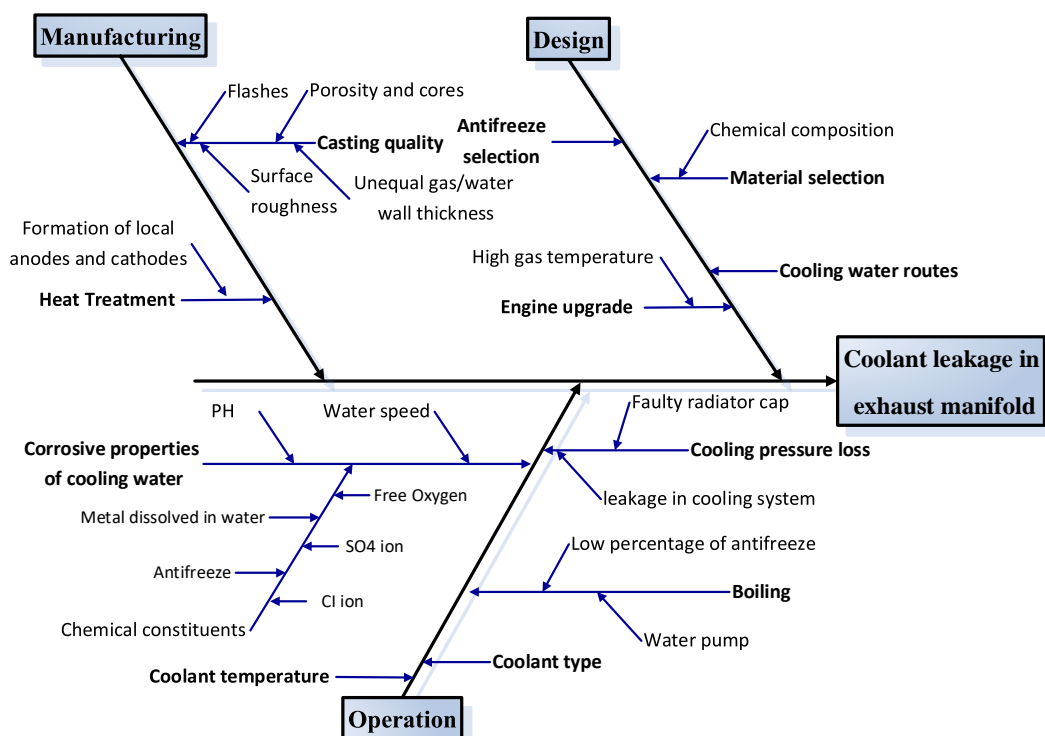
براساس این دیاگرام، فرآیند تغییر فاز حین تشکیل حباب‌ها در پدیده جوشش، منجر به جذب انرژی بیشتر توسط آب می‌شود و کارایی سامانه خنک‌کاری بهبود می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به جابه‌جا شدن حباب (که حرارت زیادی را درون خود حبس کرده است) نسبت داد [۷]، اما اگر که سرعت سیال کند باشد، حباب‌های تشکیل شده روی دیواره باقی می‌ماند و تشکیل یک لایه ی بخار را می‌دهند که اصلاحاً به پدیده خفگی^۱ معروف است. این امر موجب افزایش موضعی دمایی سطح می‌شود. با توجه به اینکه موتور بارها خاموش و روشن می‌شود، دمایی این مناطق کاهش یافته و دوباره افزایش می‌یابد که موجب اعمال تنش‌های حرارتی شدید و در نهایت خستگی حرارتی قطعه خواهد شد که به ایجاد ترک و یا کندگی سطحی منجر می‌شود. به نقطه قبل از تشکیل

^۲ Critical Heat Flux (CHF)

^۳ Fish bone diagram

^۱ Boiling

^۱ Choked and burn out point



شکل ۴ - نمودار استخوان ماهی دلایل خرابی چندراهه دود

نتایج و بحث

الف - عوامل وابسته به فرآیند طراحی

در فرآیند طراحی، موارد مختلفی می‌توانند در خرابی قطعه تاثیرگذار باشند که در ادامه بررسی می‌شوند.

انتخاب مواد

جدول ۱ آنالیز ترکیب شیمیایی متوسط چندراهه دود را نشان می‌دهد که مشابه آلیاژ AI-324 و یک آلیاژ ریختگی آلومینیوم-سیلیسیم است، می‌باشد. سیلیسیم آلیاژ چندراهه دود به میزان اندکی، بیشتر از آلیاژ AI-324 است. یکی از مهم‌ترین تأثیرات افزودن سیلیسیم به آلومینیوم، بهبود خواص ریختگی آن است. افزودن سیلیسیم به آلومینیوم، سیال بودن، قدرت تغذیه در ذوب-ریزی و مقاومت در برابر پارگی داغ را افزایش می‌دهد [۹]. سیلیسیم فاز بسیار سختی بوده و این امر موجب افزایش مقاومت به سایش آلیاژ می‌شود [۱۰]. ترکیب سیلیسیم با دیگر عناصر، موجب بهبود استحکام آلیاژ شده و به آلیاژ، قابلیت عملیات حرارتی خوبی می‌دهد [۱۱]. بر اساس دلایل موجود و از آنجا که تاریخچه کارکرد دیگر موتورها که دارای همین جنس ماده می‌باشند و تخریب نشده‌اند،

عواملی که می‌توانند باعث بوجود آمدن خرابی چندراهه دود شوند، به سه دسته عمده تقسیم می‌شوند که می‌توان آنها را به عوامل وابسته به فرآیند طراحی چندراهه دود، عوامل وابسته به فرآیند ساخت و عوامل وابسته به شرایط کاربری موتور دسته‌بندی کرد.

جهت رسیدن به ریشه‌های خرابی قطعه نیاز به انجام آزمایشاتی بر روی چندراهه دود است. در این تحقیق جهت بررسی سختی ماده از دستگاه سختی سنجی کوپا پژوهش مدل UV1 استفاده شده است. سپس با آماده سازی نمونه ساختار ماده با استفاده از میکروسکوپ نوری Carl Zeiss مطالعه شده است. همچنین سطوح خرابی قطعه با استفاده از میکروسکوپ عبوری روبشی^۱ مدل TESCAN-VEGA-XMU مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این جهت تعیین ترکیب شیمیایی زمینه و آنالیز به صورت عنصری^۲ از دستگاه Oxford Instruments X- Max 80 استفاده شده است. در ادامه این مقاله، تمامی عوامل محتمل مورد بررسی قرار گرفته می‌شود تا در نهایت بتوان دلیل اصلی ایجاد حفره در چندراهه دود را بدست آورد.

^۱ Scanning Electron Microscope (SEM)

^۲ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

آلیاژ AI-324 ریختگی شده نیز کمتر می‌باشد، دلیل این امر آن است که چندراهه دود آلومینیومی، به دلیل قرارگیری در دمای بالا به مدت زمان طولانی، دچار پیرنرمی شده است.

نشان می‌دهد که انتخاب مواد، دلیل خرابی چندراهه دود نمی‌تواند باشد. در جدول ۲ سختی آلیاژ AI-324 بعد از عملیات‌های حرارتی گوناگون با سختی چندراهه دود مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که سختی چندراهه دود حتی از

جدول ۱ - آنالیز شیمیایی جنس چندراهه دود (درصد وزنی)

عنصر	آلومینیم	سیلیسیم	آهن	مس	منگنز	منیزیم	کروم	نیکل	روی	تیتانیوم
آنالیز آلیاژ	زمینه	۸/۳۵	۰/۵۴	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۲۶	۰/۰۵	۰/۰۱۶	۰/۰۴۷	۰/۰۶۶
۳۲۴	زمینه	۸-۷	<۱/۲	۰/۰-۴/۶	<۰/۵	۰/۰-۴/۷	-	<۰/۳	<۱	<۰/۲

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ خواص مکانیکی آلیاژ ۳۲۴ بعد از عملیات حرارتی‌های مختلف

آلیاژ	عملیات حرارتی	سختی (برینل)
۳۲۴ [۹]	F	۷۰
۳۲۴ [۹]	T5	۹۰
۳۲۴ [۹]	T62	۱۰۵
چندراهه دود	-	۴۳

انتخاب سیال خنک‌کننده

شواهد نشان می‌دهد که مخلوطی از آب و ضدیخ (بر اساس دفترچه راهنمای موتور) در مدار خنک‌کننده استفاده شده است. هم‌چنین در یک موتور دیگر که مدار خنک‌کننده توسط سیال خنک‌کننده اولیه خود موتور پر شده بود، نشتی در سیستم خنک‌کننده بعد از گذشت ۵۰ ساعت مشاهده شد. از این رو ضدیخ و خوردگی ناشی از آن نمی‌تواند دلیل اصلی نشتی در چندراهه دود باشد.

ارتقای موتور

لازم بذکر است که طراحی اولیه این چندراهه دود برای موتورهایی با توان پایین‌تر بوده است و با افزایش توان موتورها به میزان ۱۸۰ اسب‌بخار، تغییر محسوسی در طراحی این چندراهه بوجود نیامده است. مطابق با جدول ۳ افزایش توان موتور، موجب افزایش دمای گاز چندراهه دود می‌شود.

جدول ۳- دمای دود خروجی از اگزوز چندراهه دود قبل و بعد از ارتقا توان موتور

نوع موتور	طراحی اولیه	ارتقا توان داده شده
دمای اگزوز (درجه سلسیوس)	۶۱۷	۷۱۲

چندراهه دود شده و تمایل به پدیده جوشش را افزایش می‌دهد. علاوه بر تمایل به پدیده جوشش سطح داغ، تنش تسلیم آلومینیوم هم وابسته به دما کارکرد است و با افزایش دما کاهش می‌یابد [۱۲]. از این رو ارتقا موتور

همچنین افزایش توان، موجب افزایش نرخ شارش گاز شده و در نتیجه ضریب هدایت حرارتی آن را افزایش می‌دهد که نهایتاً به افزایش دمای بدنه چندراهه دود منجر می‌شود. این امر موجب افزایش دمای سطح

کارکرد تأثیرگذار باشند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

عیوب ریختگی

حفره‌ها، از رایج‌ترین عیوب حین ریختگی آلیاژها آلومینیوم می‌باشند. وجود تعداد زیادی از حفره‌ها و یا بزرگ بودن آنها، موجب ایجاد ترک‌ها و حفره‌های راه‌به‌در در قطعه خواهد شد. وجود حفره‌های شبکه‌ای در برخی مقاطع، احتمال آنکه عیوب ناشی از ریختگی باشد را کاهش می‌دهد. اما نتایج میکروسکوپ عبوری روبشی مطابق با شکل ۵ وجود نوک شاخه‌های دندریتی^۲ را در برخی از ترک‌ها نشان می‌دهد. مشاهده نوک شاخه‌های دندریتی بیانگر وجود مک یا حفره ریختگی می‌باشد. اما این عیوب دلیل اصلی نشستی در سیستم خنک‌کننده نیستند.

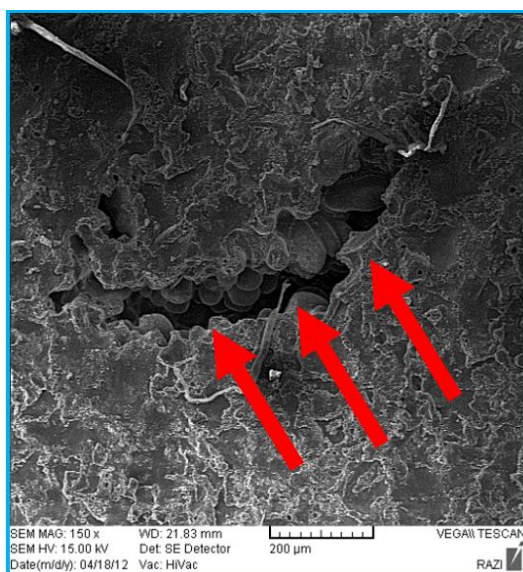
می‌تواند یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر شروع ترک و حفره در چندراهه دود باشد.

مسیر سیال خنک‌کننده

سرعت سیال یکی از مهم‌ترین فاکتورها در طراحی مسیر سیال خنک‌کننده می‌باشد. در سرعت خیلی پایین سیال، تمایل به پدیده‌های جوشش و خوردگی پیتینگ^۱ افزایش می‌یابد. به دلیل طراحی نامناسب، سرعت سیال در مناطق آسیب دیده چندراهه‌ی دود، خیلی کم می‌باشد؛ در نتیجه تمایل به پدیده جوشش و خوردگی حفره‌دار شدن در این مناطق زیاد است.

ب- عوامل وابسته به فرآیند ساخت

علاوه بر فرایندهای مرتبط با طراحی، در حین ساخت چندراهه دود، عیوب ناشی از ریختگی و عیوب ناشی از عملیات حرارتی نامناسب، می‌توانند در خرابی آن حین



شکل ۵- مشاهده‌ی دندریت در تصاویر SEM سطح ترک که بیانگر وجود مک یا حفره ریختگی است

در مباحث مرتبط به طراحی، تأثیر سرعت سیال بر پدیده جوشش بررسی شد. زائده‌های ریختگی یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش سرعت سیال و افزایش تمایل به پدیده‌های جوشش و خوردگی پیتینگ می‌باشند.

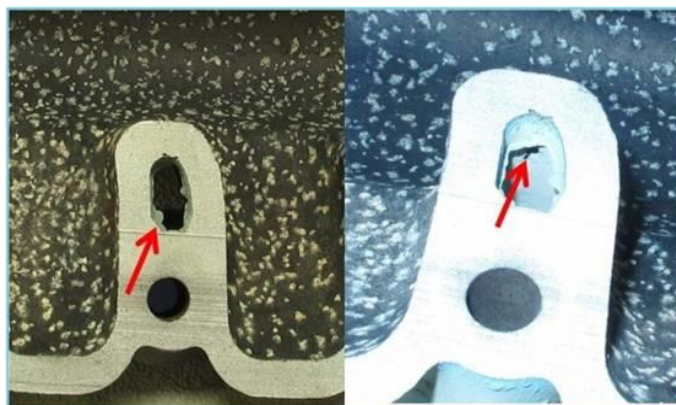
شوک‌های حرارتی ناشی از پدیده جوشش، موجب رشد حفره‌های ریختگی می‌شوند که در نهایت به تشکیل حفره‌های بزرگ در قطعه منجر می‌شود. از این رو بهتر است که از تشکیل این حفره‌ها در ریختگی جلوگیری شود.

^۱Pitting Corrosion
^۲Dendrite tips

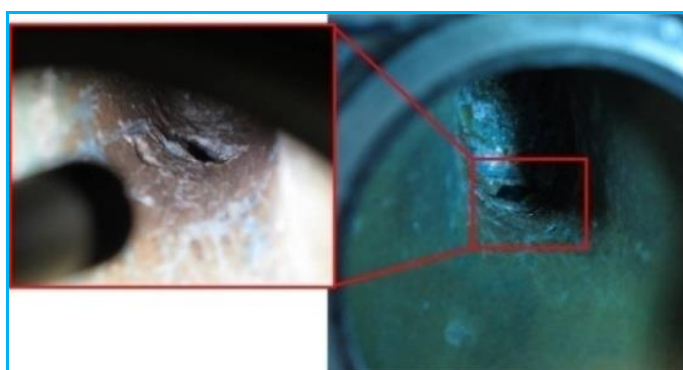
این در سایر مسیرهای آب راهگاه‌های سیلندرهای دود این چندراهه دود (که دارای مسیر آب باز بودند) حفره یا ترکی مشاهده نشد (شکل ۸).

علاوه بر این ضخامت دیواره بین گاز و سیال خنک‌کننده، مورد بررسی قرار گرفت. جهت این بررسی بخشهایی از ناحیه آسیب دیده و همچنین بخشهایی متناظر در دیگر قسمت‌هایی که خرابی در آن وجود نداشت، برش خورد. سپس ضخامت دیواره ها با استفاده از کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه گیری شد.

دو نوع زائده ریختگی در مسیرهای عبور آب مشاهده شد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، برخی از زائده های ریختگی موجب بسته شدن بخشی از راهگاه عبور آب می‌شوند. به عبارت دیگر راهگاه آب به دلیل وجود این زائده‌ها نیمه‌باز است. این زائده‌ها موجب کاهش سرعت سیال شده و خنک‌کاری را دچار اختلال می‌کند. شکل ۷ نشان می‌دهد که زائده‌ی ریختگی موجب مسدود شدن مسیر عبور سیال خنک‌کننده در سیلندر دود شماره ۲ شده و اثرات داغی سطح در این ناحیه هم مشخص است. تصویر سمت چپ نشان می‌دهد که حفرات عمیقی در این منطقه ایجاد شده است. همچنین نشانه‌های پدیده جوشش در این تصاویر به وضوح دیده می‌شود. علاوه بر

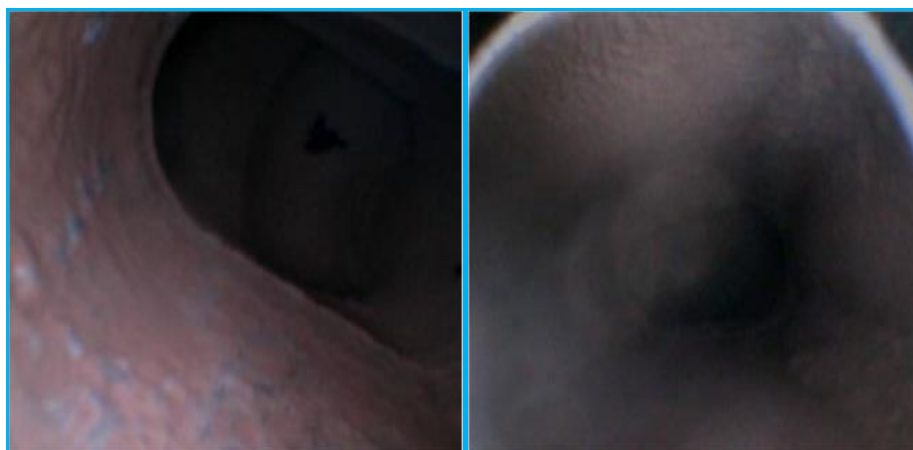


شکل ۶- تشکیل حفرات پشت زائده‌های ریختگی



شکل ۷- تشکیل حفره بزرگ پشت قسمتی از راهگاه آب که توسط زائده‌های ریختگی کاملاً مسدود شده است

(مسیر عبور آب در راهگاه دود سیلندر شماره ۲)



شکل ۸- عدم وجود ترک در مسیرهای آب سیلندرهای دود اول و پنجم که در آن زائده‌های ریختگی وجود ندارد

زبری سطح با اثرگذاری بر هدایت حرارتی، بر پدیده جوشش تأثیر می‌گذارد. افزایش زبری سطح جامد، موجب افزایش هدایت حرارتی بین سیال و جامد می‌شود. بررسی چشمی مناطق آسیب‌دیده نشان داد که سطوح آنها زیر هستند؛ از این رو زبری سطح دلیل پدیده جوشش نیست.

نتایج در جدول ۴ نشان داد که متوسط ضخامت دیواره‌ها ۸/۲۷ میلی‌متر با انحراف استاندارد ۰/۲۲ میلی‌متر می‌باشد. در نتیجه در ضخامت دیواره‌ها در قسمت‌های مختلف اختلاف زیادی وجود ندارد. بنابراین این فاکتور، عامل تأثیرگذاری در خرابی چندراهه دود نمی‌باشد.

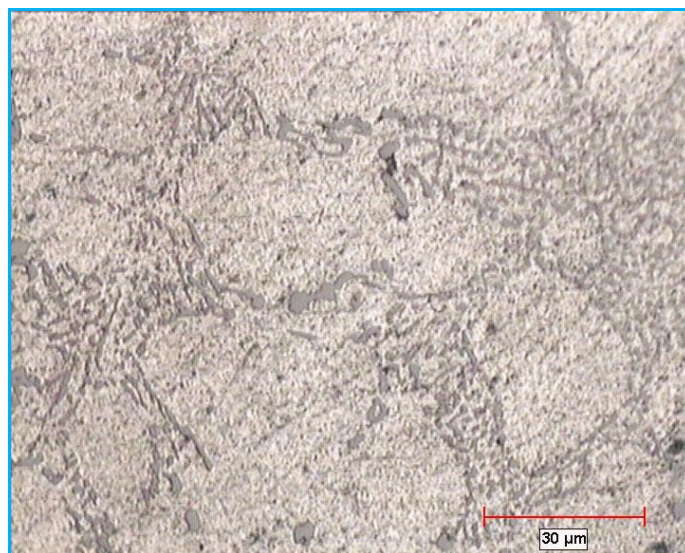
جدول ۴- ضخامت دیواره‌ی بین مجرای دود و آب در مسیرهای تنگ آب

شماره مجرای آب	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ضخامت متوسط دیواره (mm)	۸/۶۴	۸/۰۶	۸/۲۲	۸/۰۴	۸/۳۳	۸/۳۴
وضعیت خرابی	بدون حفره و ترک	بدون حفره و ترک	حفره‌دار	حفره‌دار	حفره‌دار	حفره‌دار

عملیات حرارتی نامناسب

موضعی گالوانیک ایجاد می‌شود که تمایل به خوردگی را افزایش می‌دهد [۱۴]. در مشاهدات میکروسکوپ نوری مطابق شکل ۹، چنین فازهایی مشاهده نشده است. در نتیجه عملیات حرارتی دلیل خرابی چندراهه دود نمی‌باشد.

عملیات حرارتی نامناسب آلیاژهای آلومینیوم، موجب تشکیل فازهای مضر می‌شود که اختلاف پتانسیل زیادی نسبت به زمینه دارند. این فازها نسبت به زمینه آندی‌تر و یا کاتدی‌تر هستند [۱۳]. در نتیجه سلول‌های



شکل ۹- ریزساختار آلیاژ چندراهه دود

نشان داد که در فشارهای کم، نشتی در درب رادیاتور رخ نداده است، در حالی که در فشارهای بالاتر از ۱/۴ bar، نشتی اتفاق افتاد. در نتیجه درب رادیاتور سالم بوده و نمی‌تواند موجب پدیده کاویتاسیون شود. بررسی‌های انجام شده روی مسیرهای سیستم خنک‌کاری نشان می‌دهد که به غیر از چندراهه دود، در جای دیگری از این سیستم نشتی وجود ندارد. بنابراین افت فشار در سیستم خنک‌کاری اتفاق نیفتاده و نمی‌تواند موجب پدیده کاویتاسیون و در نتیجه خرابی چندراهه دود شود.

بررسی پدیده جوشش

معیوب بودن پمپ آب یا کم بودن میزان ضدیخ (ضدجوش)، می‌تواند موجب افزایش دمای سیال خنک‌کاری و در نتیجه پدیده جوشش شود. بررسی‌ها نشان داد که پمپ آب موتورهای معیوب، سالم است. هم-چنین وجود نشتی در چندراهه دود موتورهایی که ۵۰ ساعت با سیال اولیه خود موتور کار کرده بودند، بیانگر آن است که درصد ضد یخ نمی‌تواند دلیل نشتی چندراهه دود باشد. همان‌گونه که در قسمت عیوب ناشی از ریختگی ذکر شد، یکی از عیوب مشاهده شده، زائده‌ها می‌باشند. شکل شماتیکی ۱۰ نشان می‌دهد که چگونه پشت زائده‌ها، آب حالت ایستا و ساکن پیدا می‌کند و یا حداقل سرعت آن کاهش محسوسی می‌یابد.

ج- عوامل وابسته به شرایط کاربری موتور

عوامل زیادی حین کارکرد موتور می‌توانند بر خرابی چندراهه‌های دود اثرگذار باشند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

نوع سیال خنک‌کننده

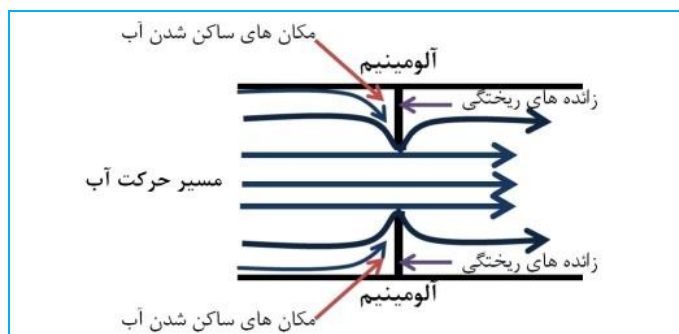
نشت سیال بعد از ۵۰ ساعت کارکرد موتورهایی که با سیال خنک‌کننده اولیه خود موتور کار می‌کردند، نشان می‌دهد که نوع سیالی که در سایر موتورها تحت استفاده قرار گرفت، نمی‌تواند دلیل اصلی خرابی چندراهه دود باشد و در این زمینه اشتباه کاربری بوجود نیامده است.

دمای سیال خنک‌کننده

در شرایط کارکرد موتور کاربر روزانه اطلاعات موتور را ثبت می‌کند. بر اساس تاریخچه این مستندات دمای آب موتور حین استفاده، کاملاً عادی گزارش شده است. از این رو این مورد نمی‌تواند دلیل تخریب چندراهه دود باشد.

افت فشار

افت فشار سیال درون سیستم خنک‌کاری تا فشار بخار آب، موجب بروز پدیده کاویتاسیون می‌شود. معیوب بودن درب رادیاتور و یا وجود نشتی در مدار خنک‌کاری می‌تواند باعث افت فشار در سیستم خنک‌کاری شود. درب رادیاتور یکی از فاکتورهای کنترل‌کننده‌ی فشار آب است. آزمون فشار هوا روی درب رادیاتور انجام شد. نتایج



شکل ۱۰ - شماتیک مسیر حرکت آب در پشت زائده‌ها

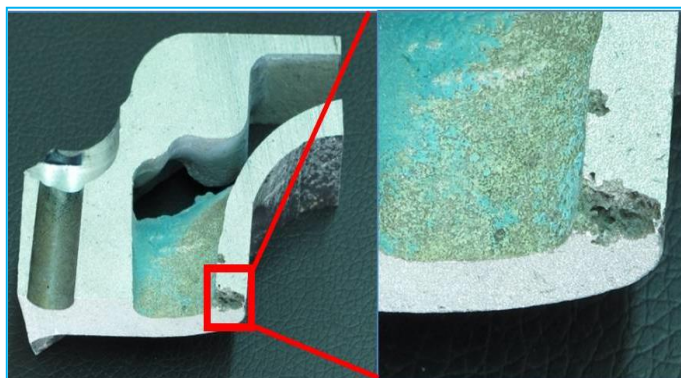
بیان شده است. به منظور بررسی سطوح شکست، یکی از بهترین روش‌ها استفاده از SEM می‌باشد که در صورت بروز خوردگی، امکان آنالیز محصولات خوردگی را فراهم می‌نماید. در این پروژه نیز از این روش جهت بررسی حفره‌ها استفاده شد. قبل از انجام SEM، تمیز کردن لایه‌ی اکسید طبیعی و دیگر اضافات از سطح ترک با استفاده از استون انجام گرفت.

شکل ۱۱ مکان تهیه تصاویر SEM و شکل ۱۲ تصاویر SEM از سطح حفره را نشان می‌دهد. لازم بذکر است که روش EDAX، نمی‌تواند مقدار دقیق عناصر C، S، O و N را آنالیز نماید، اما به خوبی می‌تواند مشخص نماید که آیا این عناصر وجود دارند یا خیر. بررسی‌های SEM نشان داد که حجم زیادی از لایه‌ی اکسیدی، روی سطح حفره‌ها وجود دارد که بعد از شستشوی استون، از بین نرفت. از این رو شستشوی اولتراسونیک در محلول آلکونوکس به مدت ۲۰ دقیقه جهت حذف لایه اکسیدی به کار گرفته شد. جدول ۵ آنالیز شیمیایی نقاط A و B در شکل ۱۲-د) را نشان می‌دهد.

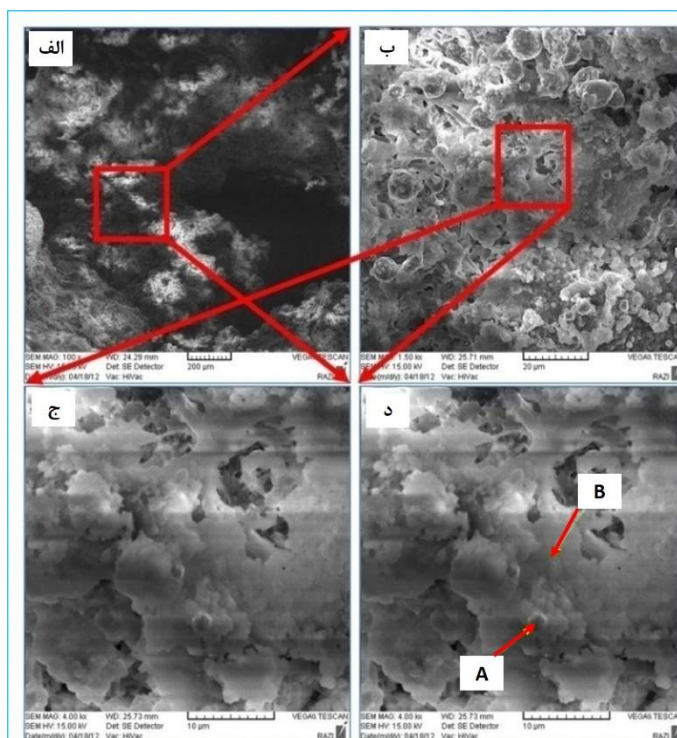
نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که سرعت سیال به طور مستقیم روی ضریب انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد و ضریب انتقال حرارت نیز روی دمای دیواره آلومینیومی در تماس با آب تأثیرگذار است. بنابراین می‌توان گفت که زائده‌های ریختگی یکی از دلایل اصلی پدیده جوشش و در نتیجه ایجاد نشتی در چندراهه دود می‌باشد. نکته‌ی قابل ذکر آن‌که، اگرچه پدیده جوشش دلیل اصلی شروع ترک در چندراهه دود است، ولی رشد آن تحت یک مکانیزم الکتروشیمیایی صورت می‌گیرد. به محض شروع ترک، تنش ناشی از شوک حرارتی، در نوک ترک تمرکز پیدا می‌کند. در نتیجه منطقه‌ای تشکیل می‌شود که نسبت به دیواره ترک آندی است. به دلیل مصرف شدن این منطقه آندی به علت واکنش‌های اکسیداسیون و احیا بین آند و کاتد، رشد ترک اتفاق می‌افتد. به این مکانیزم خوردگی گفته می‌شود و متأثر از شرایط خنک‌کننده می‌باشد.

خواص خوردگی آب خنک‌کننده

تأثیر فاکتورهای گوناگون آب شیرین بر خوردگی آلیاژهای آلومینیوم توسط دیویس [۱۲] و ویدم [۱۳]



شکل ۱۱ - مکان تهیه تصاویر SEM از عیب در چندراهه دود که باعث نشتی شده است



شکل ۱۲ - تصاویر SEM از سطح حفرات بعد از شستشو به کمک استون-الف) بزرگنمایی 100X (ب) بزرگنمایی 1500X (ج) بزرگنمایی 4000X از یک ناحیه (د) بزرگنمایی 4000X از ناحیه‌ای دیگر

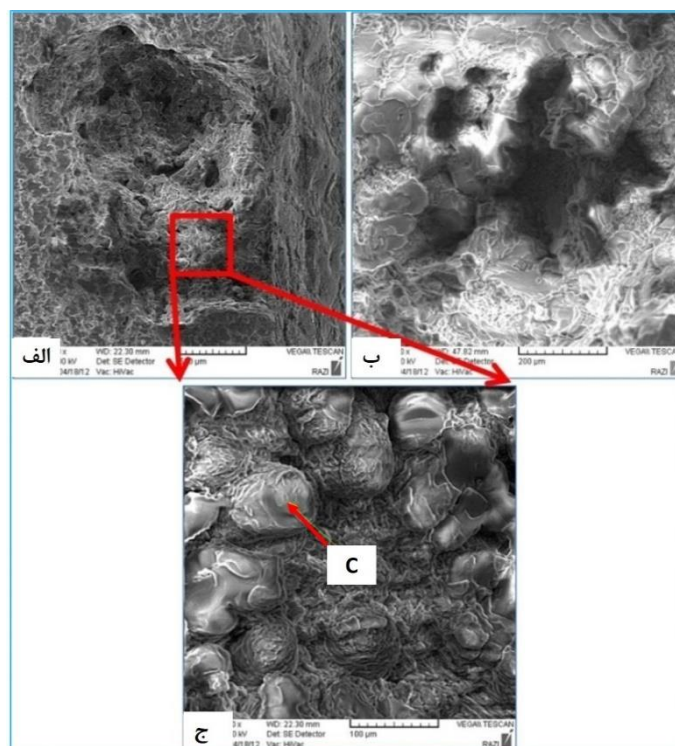
جدول ۵ - آنالیز شیمیایی نقاط A و B در شکل ۱۲-د)

عنصر	نقطه A (درصد وزنی)	نقطه B (درصد وزنی)
C	24.9	55.46
O	1.06	10.28
Al	28.72	5.26
Si	0.52	-
S	0.30	0.86
Ca	1.12	13.57
Cu	38.54	3.65
Zn	4.83	9.63
Mg	-	0.78
Fe	-	0.52

روی سطوح وجود دارد (جدول ۶). این حجم زیاد لایه اکسیدی، نمی‌تواند به دلیل اکسیداسیون طبیعی آلیاژهای آلومینیوم باشد. این اکسید، ناشی از قرارگیری قطعه تحت آب با دمای بالا می‌باشد که موجب تشکیل بوهمیت می‌شود [۱۲]. تشکیل این لایه اکسیدی مؤید پدیده جوشش است. همچنین تشکیل این لایه، موجب

شکل ۱۳-الف) نشان می‌دهد باز هم مقدار زیادی لایه اکسیدی در سطح حفرات وجود دارد. بنابراین شستشوی اولتراسونیک در محلول آلکونوکس به مدت ۲۰ دقیقه دیگر انجام شد. تصاویر SEM سطح حفرة (شکل ۱۳-ب) و (ج) و نتایج آنالیز EDX نقطه C شکل ۱۳-ج) نشان می‌دهند که باز هم مقدار زیادی اکسید

اعمال تنش به دیواره ترک شده و به رشد آن کمک می-کند.



شکل ۱۳ - لایه اکسیدی در حفره‌ها بعد از شستشوی اولتراسونیک در محلول آلکونوکس به مدت

الف) ۲۰ دقیقه با بزرگنمایی ۶۰X (ب) ۴۰ دقیقه با بزرگنمایی ۲۰۰X (ج) ۴۰ دقیقه در بزرگنمایی ۴۰۰X

جدول ۶ - آنالیز نقطه C در شکل ۱۳- (ج)

عنصر	نقطه C (درصد وزنی)
C	17.57
O	29.66
Al	34.95
Si	6.41
S	1.23
P	1.21
Ca	0.87
Mn	1.82
Zn	1.63
Mg	3.00
Fe	1.64

آنالیز نقاط A و B شکل ۱۲- (د) در جدول ۵ نشان-
دهنده وجود عناصر کربن و گوگرد می‌باشد. وجود این
عناصر ناشی از نفوذ گاز چندراهه دود به درون حفره می-
باشد. گوگرد می‌تواند موجب تسریع نرخ خوردگی و رشد

حفرات شود. وجود مس در نقطه B در شکل ۱۲- (د) در
جدول ۵، بیانگر انحلال مس حین خوردگی می‌باشد.
یون‌های مس که در تماس با آلومینیوم احیا شده‌اند، می-
توانند موجب تسریع خوردگی آلومینیوم شوند. شواهد

موجود نشان می‌دهد که احتمال وقوع پدیده‌ی پیتینگ خیلی بسیار کم است، زیرا از یک طرف دمای آب (حدود ۸۵ درجه سلسیوس) بوده و حوالی این دما، تمایل به پدیده پیتینگ به شدت کاهش می‌یابد [۱۲]، از طرف دیگر، در بقیه سطوح در تماس با آب در چندراهه دود، علائم پیتینگ مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان می‌دهد که منشا ایجاد حفره در چندراهه دود، پدیده‌ی جوشش می‌باشد. این پدیده ناشی از افزایش بیش از حد دمای سطح چندراهه دود در قسمت‌هایی از مسیر خنک‌کاری که سرعت سیال در آن خیلی پایین است، می‌باشد. دلایل اصلی خرابی چندراهه دود در ادامه ذکر شده است.

۱) مهم‌ترین دلیل پدیده جوشش، سرعت پایین سیال و افزایش دمای چندراهه دود می‌باشد. در صورتی که سرعت سیال زیاد باشد، می‌تواند با جابه‌جا کردن حباب‌های ناشی از پدیده جوشش، عمل انتقال حرارت را بهبود بخشد؛ ولی در سرعت پایین سیال، ایجاد لایه اکسیدی روی سطح، در مقابل هدایت حرارت مقاومت نموده و انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. طراحی مدار خنک‌کننده چندراهه دود به گونه‌ای است که آب در برخی از قسمت‌های آن، سرعت خیلی کمی دارد.

این امر موجب می‌شود که آب وظیفه خنک‌کنندگی خود را به خوبی انجام ندهد. در نتیجه مکان‌های داغ موضعی ایجاد می‌شود که تمایل به پدیده جوشش را افزایش می‌دهد. حال با این طراحی مدار خنک‌کاری چندراهه دود، موتور به میزان ۱۸۰ اسب بخار ارتقا یافته که باعث افزایش حدود ۱۰۰ درجه‌ای دمای دود چندراهه دود و افزایش ضریب انتقال حرارت آن شده است. از این رو، ریسک خرابی چندراهه دود موتورهای ارتقا توان یافته به مراتب بالاتر از موتورهای با توان کمتر است.

۲) وجود زائده‌های ناشی از ریختگی باعث کاهش سرعت آب شده و در نتیجه به طور موضعی مکان‌های داغی در چندراهه دود ایجاد می‌شود که در نهایت به پدیده جوشش منجر می‌شود که امکان رفع آن با اصلاح قالب ریخته‌گری و یا روشهای دیگر وجود دارد.

۳) حفره‌های ناشی از ریختگی دلیل اصلی خرابی چندراهه دود نیستند، ولی تنش حرارتی ناشی از پدیده جوشش، موجب رشد این حفره‌ها و ایجاد نشستی در چندراهه دود شده است.

References:

1. Mohrmann, R., Seifert, T., Willeke, W., Hartmann, D., "Fatigue life simulation for optimized exhaust manifold geometry", SAE Technical Papers, 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-1249>
2. Zieher, F., Langmayr, F., Ennemoser, A., Jelatancev, A., Hager, G., Wieser, K., "Advanced Thermal Mechanical Fatigue Life Simulation of Cylinder Heads", ABAQUS Users, vol. 1000, pp. 789–805, 2004.
3. Milanovic, R., Zhou, C.Q., Majdak, J., Cantwell, R., "CFD modeling of flow and heat transfer inside a liquid-cooled exhaust manifold", in Proceedings of the ASME Summer Heat Transfer Conference, vol. 2003, pp. 785–792, 2003. <https://doi.org/10.1115/HT2003-47294>
4. Korczewski, Z., "Exhaust gas temperature measurements in diagnostics of turbocharged marine internal combustion engines Part II dynamic measurements", Polish Maritime Research, vol. 23, pp. 68–76, 2016. <http://dx.doi.org/10.1515/pomr-2016-0010>
5. Assari, M.R., Adeli, S., "New Design and Analysis of Diesel Exhaust Manifold to Control Thermal Gradient", vol. 3, pp. 53–62, 2019.
6. Hamitt, F.g., "Bubble Dynamics of Cavitation and Boiling", 1997. <https://dx.doi.org/10.22060/ajme.2018.14440.5729>
7. Lienhard, IV, J. H. and Lienhard, V, J. H.}, "A Heat Transfer Textbook", Phlogiston Press, 2020, 5th edition, <http://ahtt.mit.edu>.
8. Mehdipour R, Nazaktabar M, Baniamerian Z, Aghanajafi C. Simulation of Heat Transfer in the Cooling Passages of the "EF7" Engine Considering Boiling Phenomenon. JER. 2010; 19 (19) :64-73
URL: <http://engineersearch.ir/article-1-218-fa.html>
9. Kaufman, J.G., Rooy, E.L., "Aluminum Alloy Casting Properties Processes and Applications", ASM International, 2004. ISBN: 978-0-87170-803-8.
10. Sarkar, A.D., "Wear of Aluminum-Silicon Alloys", Wear, vol. 2, pp. 331-334, 1975. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(75\)90167-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(75)90167-2)
11. Sharma, R., Anesh, D., Dwivedi, K., "Influence of Silicon (wt.%) and Heat Treatment on Abrasive Wear Behaviour of Cast Al-Si-Mg alloys", Materials Science and Engineering, vol. 12, pp. 274-280, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.013>
۱۲. حامد فتاحی، مهدی جلالی عزیزپور، " بررسی تجربی و عددی تنش پسماند در فرایند شکل دهی ورق داغ آلومینیوم ۵۰۸۳ با دمش گاز"، مجله مواد نوین، جلد ۷، شماره ۱، ص ۲۲-۱۳، پاییز ۱۳۹۵.
13. Davis, J.R., Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys", ASM International, 1999. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.caaa.9781627082990>
14. Videm, K., "Corrosion of Aluminum Alloys in High Temperature Water - A Survey", Journal of Nuclear Materials, vol. 2, pp. 145-153, 1959. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(59\)90048-0](https://doi.org/10.1016/0022-3115(59)90048-0)

