به نام خدا

بررسی مجاز بودن یا نبودن جوشکاری روی میل لنگ موتورهای سنگین

(موتور لکوموتیو – 5000 hp)

کارفرما :

شرکت راه آهن کشش

مجری:

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

اسفند 1395

فهرست مطالب

1 روش‌های نگهداری و انواع تنش‌های وارده به میل‌لنگ........5

1-1 بخش اول : مواد، روش‌های ساخت و روش‌های به‌سازی سطوح ... 6

1-1-1 مواد 6

1-1-2 ساخت 9

1-1-3 استحکام بخشی 17
1-2 بخش دوم: روشهای نگهداری میللنگ برای افزایش عمر..... 20
1-2-1 پوشش ضد خوردگی 20
1-2-2 شکل فیزکی قرارگیری 21
1-2-3 پر بودن روغن، نبودن حباب 23
1-2-4 استفاده از فیلتر روغن استاندارد و تعویض دوره ای 24
1-2-5 حذف احتمال جرقه 26
1-2-6 بازرسی میللنگ از سه منظر در تعمیرات دوره ای . 26
1-2-7 تعویض دمپر ارتعاشی در هر دوره 28
1-2-8 تعویض تعدادی از قطعات در هر تعمیر دوره ای ... 29
1-3 بخش سوم: انواع تنشهای وارده به میللنگ 29
1-3-1 تنش خمشی 32
1-3-2 تنش پیچشي 33
1-3-3 کنترل تنشهای وارده به میللنگ 34
1-4 معرفی فرآیندهای مجاز جوشکاری برای مرمت میللنگها .. 35
1-4-1 جوشکاری با الکترود پوششدار 38
1-4-2 جوشکاری قوس تنگستن 40
1-4-3 جوشکاری زیرپودر 42
1-4-4 فرآیند پاشش حرارتی 46
1-4-5 روکش کاری لیزری 49
1-4-6 بررسی توزیع تنش در میل لنگ مورد بررسی 52
1-5 مراجع 56

2- روشهای بهبود سطح و تنش گیری 58

2-1 روشهای بهبود و اصلاح سطوح خش دار میل لنگ در ناحیهٔ یاتاقانهای ثابت و متحرک 58
2-2 معرفی تنش های حاصل از انواع عملیات بهسازی میل لنگها 64
2-2-1 اهمیت تنش های پسماند 64
2-2-2 نحوه ایجاد تنش پسماند کششي در جوش 65
2-3 روشهای تنش گیری بعد از عملیات بهسازی میل لنگ مورد بررسی 69

2-3-1 عملیات حرارتی پیش گرم و پس گرم 69
2-3-2 عملیات پس گرمایش جوش 70

3- مشخصات فیزیکی-متالورژیکی و تحلیل نمونه ها 73

3-1 مشخصات فیزیکی و متالورژیکی میل لنگ ها در نواحی مختلف 80
3-2 تحلیل نمونه‌های شکسته شده 92
3-3 مراجع 94

4- جمع بندی.................................... 96

5- پیوستها 98

فاز 1

روش‌های نگهداری و انواع تنش‌های وارده به میل‌لنگ

(موتور لکوموتیو - 5000 hp)

1 روش‌های نگهداری و انواع تنش‌های وارده به میل‌لنگ

مقدمه

یکي از مهمترین، گران‌قیمت‌ترین و پیچیده‌ترین قطعات مکانیکي موتور از نظر طراحي، ساخت و تحلیل میل‌لنگ مي‌باشد. این محور تحت تنش‌های پیچشی و برشی، فشار، سایش و حرارت قرار دارد و در چنین شرایطی گشتاور موتور را منتقل می‌نماید. میل‌لنگ‌ها را از آلیاژهای فولاد با منگنز، وانادیوم، کرم، مولیبدن و یا منیزیم تولید می‌کنند. روش تولید میل‌لنگ بیشتر به صورت ریخته‌گری است. اما میل‌لنگ را به روش آهنگری نیز می‌سازند.

در بخش اول به آشنایی این قطعه پرداخته می‌شود که شامل مواد، روش‌های ساخت و روش‌های بهسازی سطوح پرداخته می‌شود.

بخش دوم به "روش‌های نگهداری میل‌لنگ برای افزایش عمر" می‌پردازد. در این بخش روش‌هایی بررسی میشود که کمک می‌کند عمر قطعه و در نتیجه ضریب اطمینان عملکرد موتور افزایش یابد. این روش‌ها ممکن است در زمان‌های ساخت، انبارش، نصب، راه‌اندازی موتور، عملکرد عمومی موتور و دوره تعمیرات، کاربرد داشته باشند.

بخش سوم به صورت مختصر "انواع تنش‌های وارده به میل-لنگ" را به صورت مختصر بررسی می‌کنند.

در بخش چهارم "معرفی فرایندهای مجاز جوشکاری برای مرمت میل‌لنگ‌ها" توضیح و تفسیر شده است. روش‌هایی در این بخش ارائه شده است که امروزه به صورت عملی، برای بازسازی میل‌لنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

1-1 بخش اول : مواد، روشهای ساخت و روشهای بهسازی سطوح

1-1-1 مواد

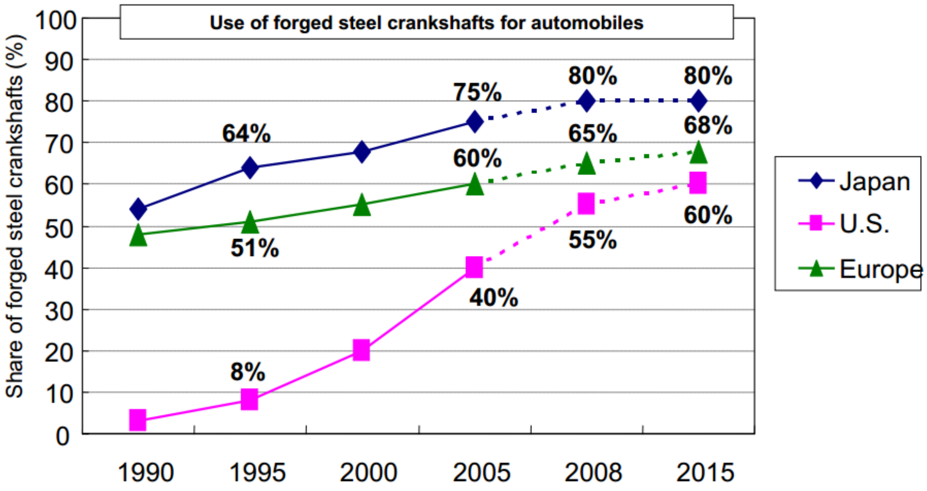
در انتخاب یک ماده براي ساخت میللنگ، فاکتورهایي چون شکلپذیري، قابلیت ماشینکاري، استحکام مکانیکي، خواص حرارتي، پایداري شیمیایي، رفتار الکتریکي و مهمتر از همه هزینه نهایي آن است. مرجع [1] ميگوید تا سال 1997 بیشتر میللنگها از جنس چدن ریختگي بوده اند و تنها موتورهاي پربازده و بیشتر در ژاپن از فولاد آهنگري استفاده کرده اند.

	Vehicles	Forged	Cast	Cast
Western Europe	11.3	3.1	8.2	73%
United States	6	0.35	5.65	94%
Japan	8.5	4.75	3.75	44%

Passenger car crankshafts
(in millions of units, 1993)

شکل 1: سهم آهنگری و ریختهگری

مرجع [2] نیز ميگوید تنها 25% از میللنگهاي طراحي و تولید شده در سال 2003 از جنس چدن ریختگي بوده و مابقي از فولاد آهنگري استفاده شده است. شرکت Sumitomo Corp. هم این مدعا را تایید ميکند که تا سال 2015 بیش از 75% میللنگها از جنس فولاد آهنگري خواهد بود.



شکل 2: روند رشد تولید به روش آهنگری

اگرچه نمی‌توان آمار دقیق و درستي براي سهم هریک به صورت متقن ارائه داد، اما این مسئله کاملاً مشخص است که با توجه به کوچکسازي موتورها و پربازده شدن آنها، استفاده از آلیاژهاي فولادي به جاي چدن ریختگي در حال افزایش است. با این حال چدن‌هاي ریختگي همچنان به عنوان یکي از مواد ساخت میل‌لنگ باقي خواهند ماند.

1-1-1-1 فولاد

در سال‌هاي اخیر مطالعات گسترده‌اي جهت کاهش قیمت و افزایش عملیات حرارتي و بهبود کیفیت ماشینکاري فولادهاي آهنگري صورت گرفته تا آنها را از این لحاظ قابل رقابت با چدن‌ها در ساخت میل‌لنگ کند. از فولادهاي SAE 1045 یا SAE 1548 گرفته که استحکامي برابر با چدن معمولي دارد (البته با تفاوت مقدار بیشتر Elongation) تا میکرو آلیاژهاي 38MnS6 یا 38MnVS5که استحکامي نزدیک به 750-1000 MPa، را دارا هستند. براي تحمل بارهاي بیشتر استفاده از آلیاژهایي با ترکیبات نیکل، مولیبدن و کروم مانند42CrMo4 یا34CrNiMo6 که 800 تا 1200 MPa نیز استحکام دارند، استفاده مي‌شود. قابل توجه است که در تمامي فولادها نسبت به چدن، مقدار تغییرطول تا شکست بسیار بیشتر است و این عامل مهمي در افزایش عمر خستگي و میراکردن ارتعاشات است.

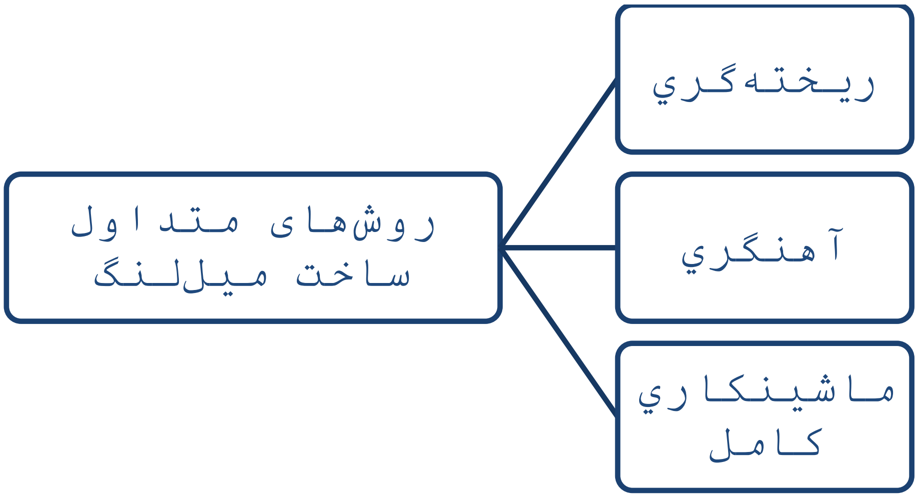
Standard	AISI: 1045	AISI: 4340	DIN: 42CrMoS4	38MnVS5 (C38 mod)	38MnS6	SAE1548 mod
Density (g/cc)	7.85 -7.87					
Modulus	210					
Hardness (HB)	163	217	235-295	250-300	250	197
UTS (MPa)	565	745	850-	850-1،000	750-900	660
YS (MPa)	310	470	550	550	465	365
Fatigue			550	384-484		
Elongation	16	22	13	8	16.3	14

1-1-1-2 چدن

هنوز به دو علت هزينة مواد اوليه كمتر و ماشينكاري ارزانتر، چدن انتخاب مناسبي براي ماده اولية ميل‌لنگ به شمار مي‌آيد. امروزه نزديک به 99% چدن‌هاي استفاده شده از نوع چدن داكتيل يا نشكن در ساخت ميل‌لنگ استفاده مي‌شود. اين چدن داراي زمينه فريتي، پرليتي يا هر دو با گرافيت كروي است. به هنگام انجماد، كربن آن به صورت گرافيت كروي يا گلوله‌اي تشكيل مي‌شود. از خواص آن، نقطه ذوب پايين، ريخته‌گري مناسب، ماشينكاري عالي، مقاومت سايشي خوب، شكل‌پذيري مطلوب است. در مواردي نيز از چدن آستمپره شده (ADI) استفاده شده كه در حقيقت همان چدن نشكن است كه مشمول عمليات حرارتي شده است. اين فرآيند در حقيقت يكي از راههاي بهبود خواص مكانيكي چدن براي بقاء در رقابت با فولاد خواهد بود.

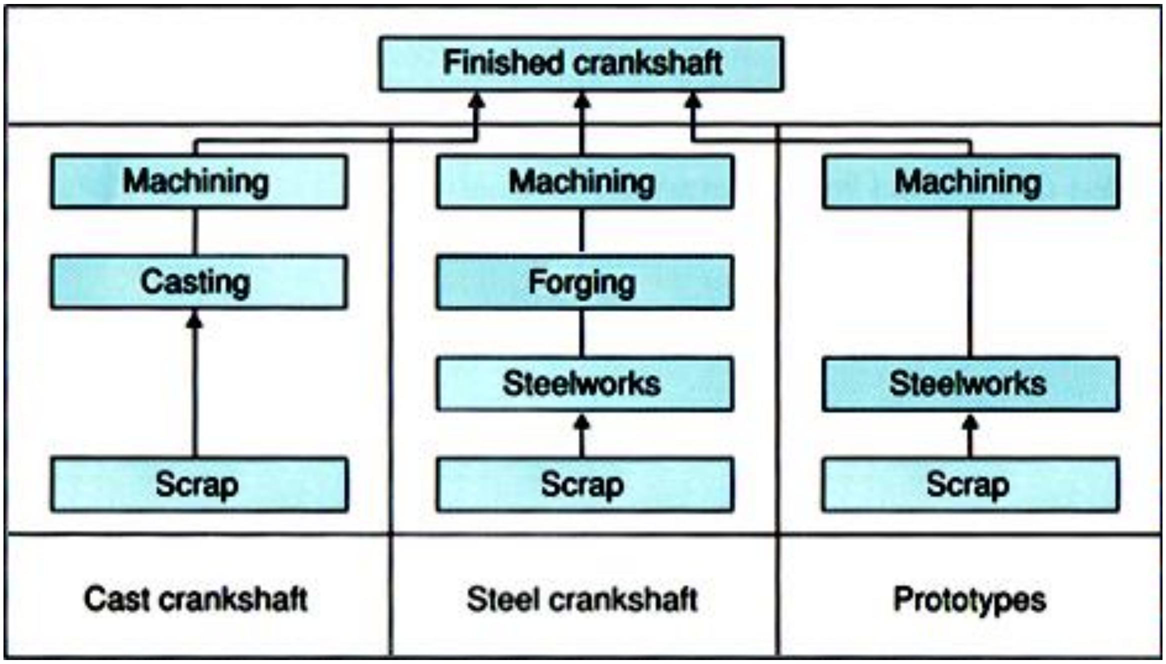
1-1-2 ساخت

گام اول طراحي با توجه به شيوه ساخت ميللنگ مشخص ميشود. سه راه زير براي ساخت يك ميللنگ وجود دارد.



توليد به روش ريختهگري هزينه كمتري نسبت به روشهاي ديگر دارد، اگرچه در عوض استحكام كمتري نسبت به دو روش ديگر دارد. ميللنگ آهنگري شده معمولا هزينه سرمايهگذاري اوليه و هزينه توليد بيشتري دارد. ميتوان گفت روش آهنگري براي موتورهاي پربازده، مثلاً موتورهاي پرخوران، موتورهاي ديزل پاشش مستقيم و فشار بالا، كاربرد بيشتري دارد. روش ماشينكاري كامل هم با توجه به قيمت بسيار بالاتر از دو روش ديگر، صرفاً براي ساخت نمونه اوليه استفاده شده و براي توليد سري كاربردي ندارد.

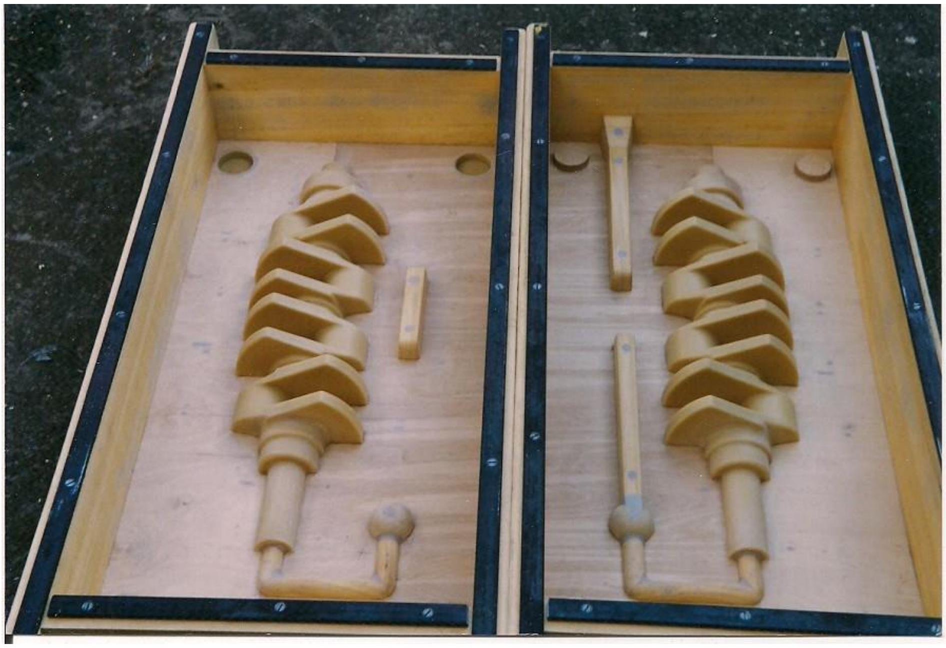
فرآيند توليد ميللنگ در هر سه روش به اختصار در شكل زير آمده است.



شکل 3: روشهای تولید میللنگ

1-1-2-1 ريختهگري

فرآيند ريختهگري ماسهاي، فن شكل دادن فلزات و آلياژها از طريق ذوب، ريختن مذاب در محفظهاي به نام قالب و آنگاه سرد كردن و انجماد آن مطابق شكل محفظه قالب ميباشد. اين فرآيند شامل قراردادن الگو در ماسه، تعبيه سيستم راهگاهي مناسب، پركردن حفرهها با مذاب، خنك كردن مذاب تا منجمد شدن قطعه، خرد كردن قالب ماسهاي و درآوردن قطعه ريختهگري است. هر چند اين روش، يک روش باستاني در توليد قطعه است، ولي هنوز رايجترين روش ساخت بسياري از قطعات خودرويي و غيرخودرويي است. بطور مثال سالانه 5.5 ميليون قطعه ميللنگ در آمريكاي شمالي در شركت GM به اين روش ساخته ميشوند.



شكل 4: قالب ماسه‌اي ميل‌لنگ

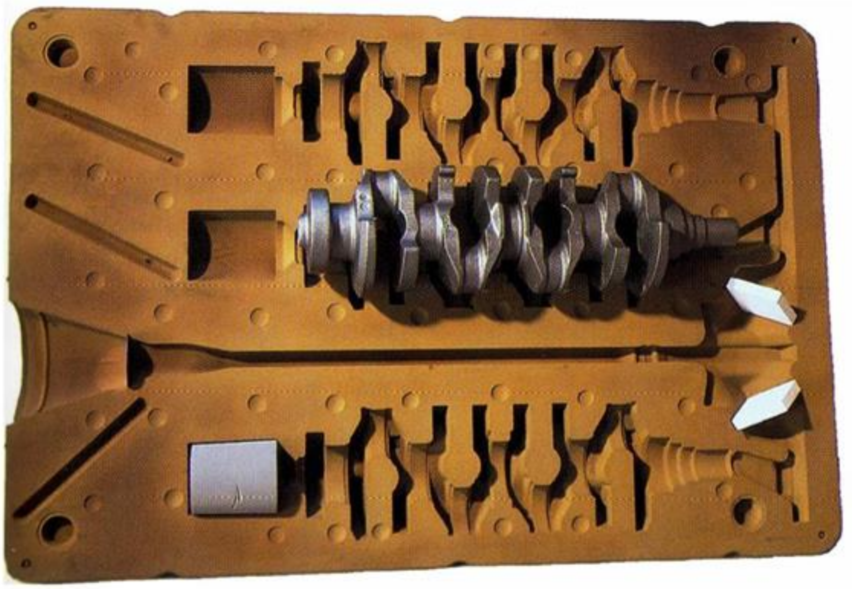
فرآيند ساخت قالب به صورتي است كه مجددا از اين ماسه‌ها در ساخت قالب‌هاي بعدي استفاده مي‌شود. محفظه قالب دقيقا به شكل ميل‌لنگ ساخته شده است. براي ساخت قالب ماسه اي ميل‌لنگ به روش ريختگي، مواردي همچون هزينه نهايي، كيفيت و دقت قطعات لحاظ مي‌شود. دو روش معمول توليد قالب به اين قرار است:

- قالب ماسه تر
- قالب پوسته‌اي

قديمي‌ترين روش اتصال دانه‌هاي ماسه، استفاده از خاك رس و آب به عنوان چسب است (10 درصد يا بيشتر خاك رس). استفاده از واژه "تر" به آن علت است كه ماسه مورد استفاده در هنگام ريختن مذاب، داراي رطوبت است. البته مي‌توان آنرا در كوره‌هايي با دمايي پايين قرار داد تا خشك شده و استحكامش افزايش يابد. امروزه ديگر از روش خشك‌كردن در كوره استفاده نمي‌شود و به جاي آن از چسب‌هايي با تركيبات شيميايي استفاده مي‌شود. اما ماسه تر همچنان پر كاربردترين روش قالب‌گيري خصوصا براي قطعات چدني همچون ميل‌لنگ است. مزيت

مهم این روش علاوه بر هزینه کمتر نسبت به قالب‌های دیگر، سازگاری این روش با اکثر مواد و قالبها در عین هزینه کمتر است.

در روش قالب پوسته‌ای، مدل میل‌لنگ ساخته شده از آلومینیم یا آلیاژهاي آهني بین 175-370 درجه گرم شده و از طریق غوطه‌وري یا پاشیدن مخلوط ماسه سیلیسي و چسب‌هاي ترموست روي مدل، قالب ایجاد مي‌شود. سپس مجموعه براي مدت اندکي به منظور پخته شدن رزین در داخل کوره قرار داده مي‌شوند و پوسته دور مدل سخت شده و توسط میله بیرون‌انداز از روي مدل میل‌لنگ جدا مي‌شود. این پوسته‌ها ضخامتي بین 5-10 میلیمتر دارند. با ایجاد دو پوسته و چسباندن آنها به هم، محفظه قالب تشکیل مي‌گردد. براي محکم شدن صفحات و جلوگیري از شکستن آنها، پشت آنها با ماسه معمولي پر مي‌شود.

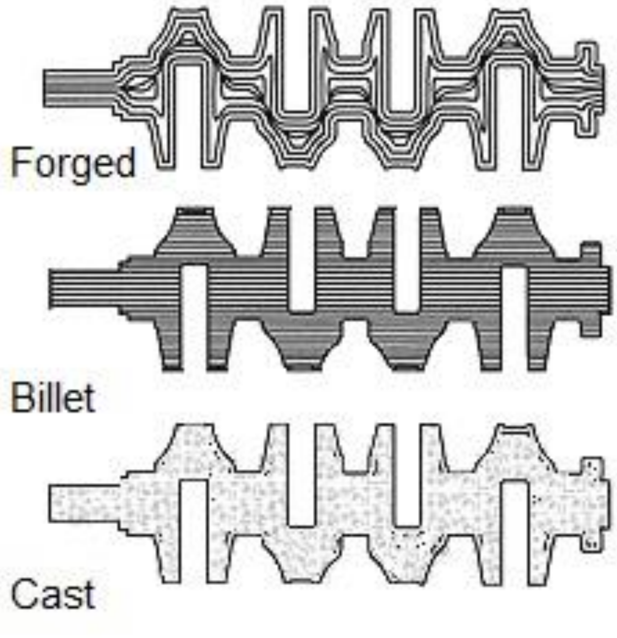


شکل 5: قالب پوسته‌ای میل‌لنگ

1-1-2-2 آهنگري

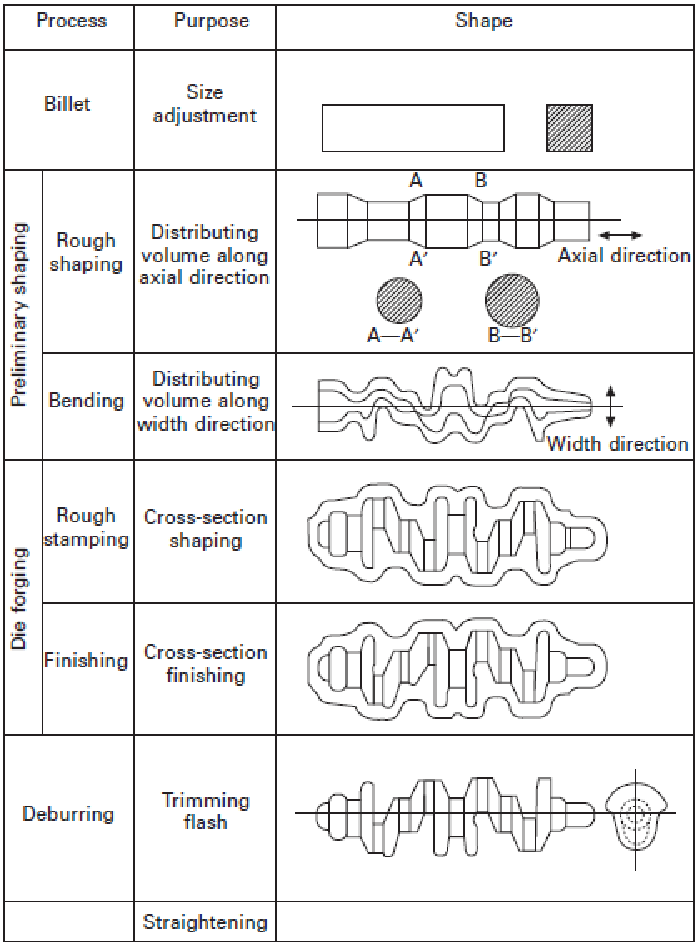
آهنگری (Forging) کار بر فلز توسط پتککاری یا پرسکاری و درآوردن آن به یک شکل معین است. آهنگری از قدیمی‌ترین هنرهای فلزکاری است و منشاء آن به زمان‌های بسیار دور باز

می‌گردد. فرآیند آهنگری نوین نیز بر همین اساس استوار است. این فرآیند معمولا به صورت گرم انجام می‌گیرد و هر فلزی تا دمای معینی در کوره گداخته می‌شود. سپس این قطعه اولیه که لقمه نامیده می‌شود در میان دو نیمه قالب قرار می‌گیرد و بر اثر نیرویی زیاد (فشار آرام یا ضربه) شکل و فرم داخل قالب را به خود می‌گیرد و فلز اضافی به حفرة کناری وارد می‌شود که بعداً از قطعه جدا می‌شود. گاهی بر اساس شکل و نوع قطعه، برای رسیدن به فرم نهایی، از چندین قالب و چند مرحله آهنگري استفاده می‌شود، زیرا با یک عمل پرس‌کاری، تولید قطعه کامل میسر نخواهد بود و قطعة کار به مرور و طی چند مرحله باید شکل نهایی را کسب نماید. اگرچه قطعاتی که با این روش تولید می‌شوند، با روش‌هایی چون ریخته‌گری، متالوژی پودر و ماشینکاری نیز ساخته می‌شوند، ولی قطعات ساخته شده در این روش، برخلاف روش‌های ذکر شده، با تغییر شکل پلاستیک، در اثر نیروی فشاری زیاد بوجود می‌آید. بنابراین جریان فلز و ساختار دانه‌های آن، کنترل شده است و در نتیجه، استحکام و چقرمگی بالاتری پیدا می‌کند. از این روش برای تولید قطعاتی چون میل‌لنگ، شاتون و چرخ‌دنده‌ها که در معرض تنش‌های بالا هستند، استفاده زیادی می‌شود.



شکل 6: جریان فلز در سه شکل تولید

شکل زیر فرایند آهنگری برای یک میل‌لنگ یکپارچه را نشان می‌دهد. در قسمت اول شمش فولادی با مقاطع مربعی به عرض 8-16 cm در طول معین بریده می‌شوند. سپس در کوره‌های حرارتی یا القای تا دمای 1000 °C گداخته می‌شوند. کوره‌های القایی به منظور اکسیداسیون یا کربن‌زدایی، کمتر توصیه می‌شوند که ناشی از گرمایش با سرعت بالاست. آهنگری اولیه ضخامت مواد را صرفاً در جهت طولی گسترش می‌دهد. در مرحله دوم عمل خم‌کاری و چرخاندن مواد در قالب صورت می‌گیرد. در مرحله قالب آهنگری، مقاطع پیچیده میل‌لنگ شکل می‌گیرد. سپس قالب بعدی، اندازه‌های دقیق قطعات را ایجاد می‌کنند. در مرحله نهایی هم اضافه‌ها برشکاری می‌شوند.



شکل 7: تولید به روش آهنگری

در فورج داغ به نیروی کمتری نیاز است ولی قطعات تولیدی با این روش به دلیل انباشت اکسیدها در سطح قطعه، دارای سطح پایانی و دقت ابعادی چندان خوبی نیستند. معمولاً قطعات تولیدی توسط فورج به عملیات اضافی (پایانی) جهت تبدیل شدن به قطعه مناسب کار وحصول دقت مطلوب نیاز دارند. میللنگ نیز به موادی با استحکام بالا نیاز دارد که عموماً خواص فورجپذیری و ماشینکاری خوبی ندارند و در نتیجه فرآیند تولید گرانی دارند. فولاد کروم مولیبدن اگرچه استحکام بالاتری دارد، اما مقاومت بالای تغیر شکل آن موجب کاهش عمر قالب میشود. برای رقابتی شدن این فرآیند با ریختهگری، لازم است تا هزینههای این فرآیند به حداقل برسد که در زیر به مواردی اشاره میشود:

1- انجام آهنگری در دمای پایین‌تر

2- استفاده از موادی نرمتر جهت افزایش عمر قالب و کاهش قدرت مورد نیاز پرس

3- عدم استفاده از زوایای تند در قطعه جهت کاهش تمرکز تنش در قطعه و افزایش عمر قالب

4- استفاده قالب در تیراژ بالا به منظور کاهش زمان تعوض و تولید

5- امکان حداقل سازی مواد زائد و برش نهایی

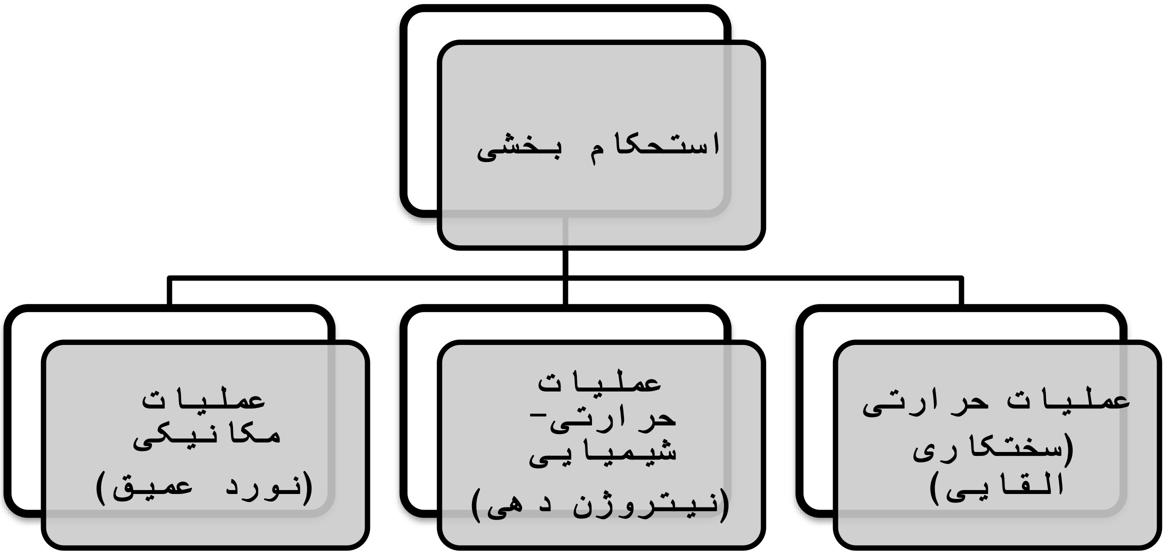
1-1-2-3 ماشينكاري كامل

اين روش براي ساخت ميللنگ به صورت محدود استفاده مي‌شود. اين روش استفاده وسيعتري از مواد با خواص استحكامي و سايشي مناسب نسبت به دو روش گذشته را ممكن مي‌سازد. در دو روش ديگر به علت وجود قالب (قالب ريخته‌گري يا قالب فورج) محدوديت زوايا و ضخامت و تغيير شكل وجود دارد اما در روش ماشينكاري كامل، انعطاف بيشتري در ساخت قطعه وجود دارد كه دست طراحان را براي آزمون طرحهاي جديد و خلاقانه، باز مي‌گذارد. عدم نياز به قالب اوليه، كاهش زمان توسعه و هزينه ساخت را منجر خواهد شد. اين دلايل موجب شده است تا سازندگان موتورهاي خاص و توسعه دهندگان موتور، دو دسته اصلي استفاده كننده از اين روش باشند. دسته اول به علت تعداد توليد محدود، صرف هزينه طراحي و ساخت قالب را توجيه‌پذير نمي‌دانند و اين روش را ترجيح مي‌دهند. توسعه دهندگان موتور نيز علاوه بر كاهش هزينه‌ها بايد در پي كاهش زمينه‌هاي توسعه باشند كه در دو روش گذشته، توسعه قالب فرآيندي زمان‌بر است و آنها را علاقمند به استفاده از از روش ماشينكاري كامل مي‌كند. در اين روش دانه‌بندي مواد موازي با محور اصلي ميللنگ است و مي‌تواند امكان ايجاد ترك در نواحي پرتنش را تشديد كند. از طرفي به علت تيراژ محدود

قطعه، قیمت بسیار بالاتري به ازاي هر عدد میللنگ وجود دارد.

1-1-3 استحکام بخشی

عملیات‌های متنوعی برای افزایش توانایی و استحکام میللنگ برای انجام وظایفش وجود دارد که به صورت کلی شامل سه دسته اصلی عملیات حرارتی، عملیات حرارتی-شیمیایی و عملیات مکانیکی است. این فرآیندها عموما بر روی فیلتها و سطح یاتاقانهای میللنگ انجام می‌شود تا استحکام در این نقاط پرخطر را بهبود دهد و بتواند از فلزات ارزانتر با روش تولید ارزانتری برای تولید میللنگ استفاده کرد.



روشهای مختلف عملیات حرارتی که به کمک آن می‌توان سطح قطعات را سخت کرد، به دو دسته تقسیم می‌شوند:

1- روشهایی که بدون تغییر ترکیب شیمیایی سطح و فقط به کمک عملیات حرارتی که در لایه سطحی متمرکز شده و باعث سخت شدن سطح می‌شوند و به عملیات حرارتی موضعی موسومند مانند

سخت کردن شعله‌ای و سخت کردن القایی (امروزه از سخت کاری القایی بیشتر استفاده می‌شود).

2- عملیات‌هایی که منجر به تغییر ترکیب شیمیایی سطح فولاد شود و به عملیات حرارتی - شیمیایی معروف است، مانند، کربن‌دهی (Carburizing) نیتروژن‌دهی(Nitriding) کربونیتریده کردن (Carbonitriding) و نیترو کربوره کردن (Nitrocarburazing) که نیتروژن‌دهی در عملیات استحکام بخشی میل‌لنگ کاربرد دارد.

1-1-3-1 عملیات حرارتی (سختکاری القایی)

سختکاری یا سخت کردن سطحی نوعی عملیات حرارتی که در آن با استفاده از شرایط خاص کاری و محیطی سطح قطعه را سخت کرده در حالی که ترکیب شیمیایی داخل قطعه تغییر نمی‌کند و در نهایت قطعه‌ای حاصل می‌شود که سختی سطحی مطلوب (مقاومت به سایش) در کنار چقرمه بودن دارد. این نوع عملیات حرارتی، آخرین عملیاتی بوده که باید در مرحله پایانی ساخت قطعه و پس از انجام تمام مراحل مربوط به شکل دادن نظیر ماشین‌کاری و قبل از سنگ زدن نهایی انجام گیرد.

سطح میل‌لنگ‌های ساخت کارخانه (تولید آهنگری یا ریخته‌گری) عمدتا سختکاری القایی می‌شوند. قطعه توسط یک میدان مغناطیسی با فرکانس بالا به سرعت تا دمای بیش از دمای آستنیتی (700 تا 900 درجه سانتیگراد بسته به مقدار کربن موجود در آلیاژ) گرم می‌شود و سپس با یک مایع پرفشار به سرعت خنک می‌شود و تا عمق 2 میلیمتر (5 برابر روش نیتروژن دهی) را سخت کاری می‌کند. وقتی قطعه به سرعت خنک می‌شود ماده جدیدی تشکیل می‌شود که ساختار مارتنزیتی دارد. این ساختار بسیار سختتر از ساختار اولیه و با افزایش حجم همراه است و تنش‌های فشاری در قطعه ایجاد می‌کند. در این روش نظر به گرادیان دمایی بالا از سطح تا عمق قطعه، تنش‌های پسماند ایجاد می‌کند. با این حال نظر به این که فرآیندی اقتصادی‌تر از روش نیتروژن‌دهی است، در ساخت میل‌لنگ بصورت

تولید انبوه کاربرد دارد. نقطه ضعف این روش، هزینه بالای راه اندازی و سرمایه گذاری اولیه تولید است که این تنها متناسب با تولید انبوه قطعه است.

برای میللنگ چدن ریختگی که خود سختی 25-300 برینل دارد با این فرآیند به 550 تا 580 برینل می‌رسد.

1-1-3-2 عملیات حرارتی-شیمیایی (نیتروژن دهی)

به منظور پرهیز از تنشهای پسماند بوجود آمده در میللنگ، روشهای جایگزینی برای افزایش سختی سطحی میللنگ ارائه شده است. نیتروژن دهی یا نیتریده کردن (Nitriding)، نوعی عملیات سختکاری سطحی بوده که در آن آلیاژهای آهنی ویژه، در محیط غنی از نیتروژن تا دمای پایین‌تر از دمای سخت کاری القایی (در حدود 500 درجه سانتیگراد) گرم شده و با نگهداری در این دما به مدت زمان کافی (20 ساعت برای نفوذ 0.2 میلیمتر)، نیتروژن به داخل آلیاژ نفوذ می‌کند. با نفوذ نیتروژن و تشکیل انواع نیتریدها، لایه سطحی آلیاژ سخت می‌گردد.

نیتروژن این فرآیند را می‌توان از تجزیه آمونیاک گازی و یا نمکهای سیانیدی تامین کرد. سختی سطح در این روش بستگی به نیترید فلزی تشکیل شده دارد و تنها زمانی می‌توان سختی بالایی در سطح بدست آورد که قطعه مورد نظر از جنس فولادهای آلیاژی مخصوص و شامل عناصر آلیاژی نظیر آلومینیوم، کروم، مولیبدن و یا وانادیم باشد. این عناصر به محض تماس با نیتروژن اتمی در سطح قطعه، با آن ترکیب شده و تشکیل نیتریدهای پایدار و سخت می‌دهند که در واقع سختی زیاد لایه‌های سطحی فولادهای نیتریده شده ناشی از وجود همین ذرات بسیار ریز و پراکنده نیتریدهای آلیاژی می‌باشد. این روش برای آلیاژهای چدنی و میللنگ ریختگی کاربرد ندارد و صرفا در میللنگ فورج شده یا ماشینکاری از بیلت فولادی کاربرد دارد. عمق نفوذ سختی در این روش تنها 0.2 تا 0.3

میلیمتر است اما در عوض تنش موضعی در قطعه ایجاد نمی‌کند. در نهایت، برای صیقلی کردن و کاهش اصطکاک، محورها را پولیش می‌زنند. شرکت اسکات (یکی از تولیدکنندگان اصلی میل‌لنگ) نیز می‌گوید این روش تا 20 درصد میتواند استحکام خستگی میل‌لنگ را افزایش دهد. از دیگر تفاوتهای این روش با روش القایی آن است که سختکاری القایی بیشتر به صورت موضعی است اما در این روش تمام قطعه سخت می‌شود. در ضمن به علت زمان‌بر بودن فرآیند و ترکیبات شیمیایی، قابل استفاده در خط تولید پیوسته نیست.

از معایب این روش، گران بودن عملیات است که متأثر از زمان طولانی فرآیند است (20 ساعت برای نفوذ 0.2 میلیمتر)، در ضمن با توجه به عمق کم سختی، برای هر بار سنگزنی تعمیراتی، نیاز به نیتروژن‌دهی مجدد دارد. این فرآیند می‌تواند سختی یک میل‌لنگ آهنگری را از 290 برینل به 650 برینل برساند.

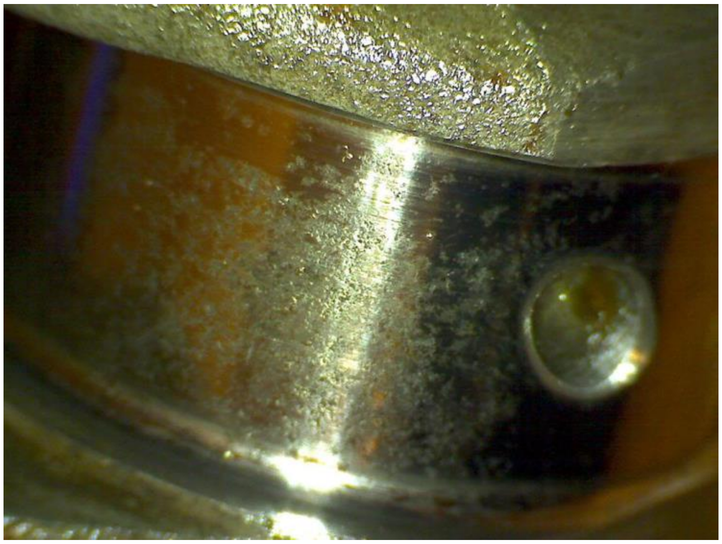
1-2 بخش دوم: روش‌های نگهداری میل‌لنگ برای افزایش عمر

هدف از ارائه این بخش، بررسی روشهایی است که کمک می‌کند عمر این قطعه مهم و گران‌قیمت موتور و در نتیجه ضریب اطمینان عملکرد موتور افزایش یابد. این روشها ممکن است در زمان‌های ساخت، انبارش، نصب، راه‌اندازی موتور، عملکرد عمومی موتور و دوره تعمیرات، کاربرد داشته باشند.

1-2-1 پوشش ضد خوردگی

فلزات بطور خالص در حالت ناپایدار قرار دارند، میل طبيعي این عناصر در تبدیل شدن به اکسیدها و پایدار شدنشان است. چه بسا حوادث ناگواري بدلیل خوردگي و اکسید شدن شفت‌های انتقال دهنده گشتاور همچون میل‌لنگ اتفاق افتاده است. اگرچه خوردگی به‌خودی خود عامل شکست نیست،

اما می‌تواند محل ایجاد ترک یا تمرکز تنش شده و ضریب اطمینان عملکرد قطعه را به شدت کاهش دهد. در ضمن در صورت خوردگی بیش از حد، اندازه‌ها و تلرانس‌های استاندارد میل‌لنگ تغییر کرده و احتمال خرابی را افزایش می‌دهد.



شکل 8: خوردگی در معرض محیط خورنده

قرار گرفتن میل‌لنگ در فاصله زمانی تولید تا نصب، در معرض هوا یا هر محیط خورنده چون آب نمک، احتمال خوردگی و آسیب دیدگی میل‌لنگ را افزایش می‌دهد. ساده‌ترین راه مبارزه با خوردگی، اعمال یک لایه پوشش رنگی، فسفاتی، کروماتی، قلع و ترکیبات پایه نفتی، بصورت آستر و رویه است تا ارتباط فلز را با محیط تا اندازه‌ای قطع کرد و در نتیجه موجب محافظت فلزی شود. استفاده از ترکیبات پایه نفتی همچون بعضی گریس‌ها برای نگهداری و انتقال بسیاری از قطعات موتور، امری بسیار متداول است. شرکت‌های بزرگی چون Caterpillar استفاده از ماده ضد خورنده Cosmoline را به عنوان پوشش استاندارد قطعات موتوری برگزیده‌اند.

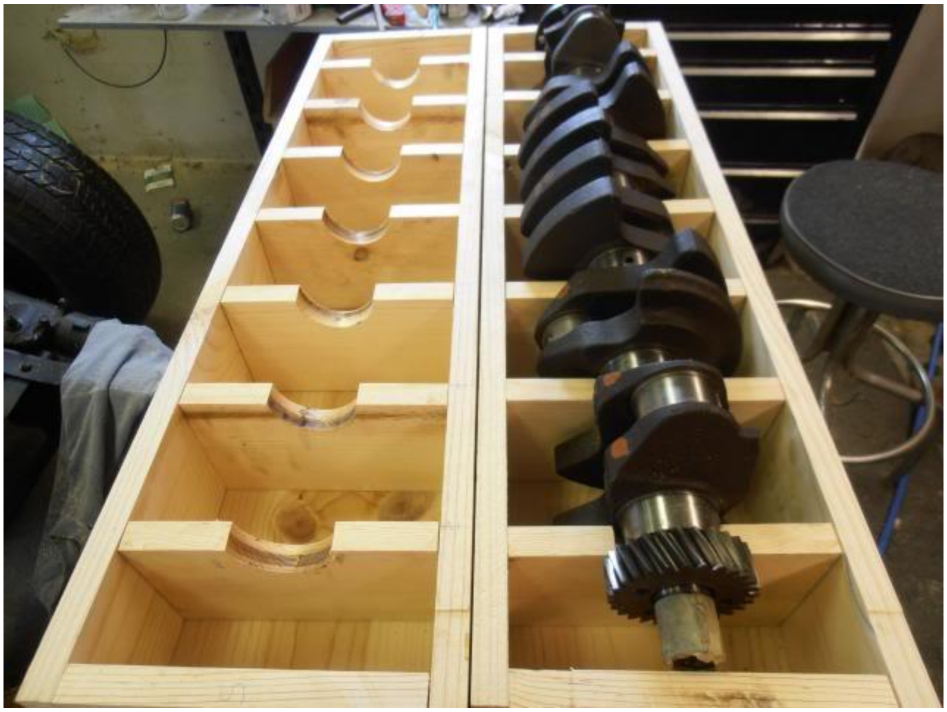
1-2-2 شکل فیزیکی قرارگیری

میل‌لنگ در اثر نیروی وزن خود، می‌تواند دچار تغییر شکل شود. به علت شکل شفت‌مانند، احتمال خمش میل‌لنگ در اثر وزن در راستای محور طولی آن وجود دارد. عمده سازندگان به این

علت، ترجیح می‌دهند میل‌لنگ را به صورت آویزان، نگهداری کنند.

شکل 9: نگداری با روش آویزانی

اما این شکل نگهداری برای میل‌لنگ‌های با طول و وزن زیاد، عملاً امکان‌پذیر نیست. در این حالت سازندگان، سعی می‌کنند تا میل‌لنگ را روی نگهدارنده‌ای همچون یاتاقان‌های واقعی موتور قرار دهند. اگرچه این شکل نگهداری، بعد از روش آویزان، بهترین روش است، اما باید پذیرفت که این حالت با حالت واقعی عملکرد میل‌لنگ (چرخش) هنوز فاصله دارد و می‌تواند با مرور زمان موجب خمش‌های موضعی و خروج از تلورانس توازی محورها شود.



شکل 10: قرارگیری روی یاتاقان‌ها

1-2-3 پر بودن روغن، نبودن حباب

موارد ذکر شده تا بحال، در مرحله قبل از نصب اهمیت داشت. در مرحله عملکرد موتور اگر بتوانیم در تمام شرایط برای میل‌لنگ اصطکاک روغنی ایجاد کنیم تا در قشری از روغن شناور باشد، از اصطکاک خشک و سایش شدید آن جلوگیری کرده‌ایم. در این صورت عمر میل‌لنگ افزایش می‌یابد و از هزینه‌ی تعمیرات موتور کاسته می‌شود. روی میل‌لنگ مجراهایی برای روغن کاری یاتاقان‌ها وجود دارد. معمولاً محورهای ثابت توسط کانال اصلی روغن‌کاری می‌شوند و در ادامه روغن از مجرای محور اصلی به یاتاقان متحرک راه می‌یابد و محور متحرک را روغن کاری می‌نماید. بنابراین سرویس دوره ای بازدید و تعویض روغن موتور از مهمترین اولویت‌های نگهداری است. توصیه می‌شود مقدار روغن به طور مداوم بازدید شود و در صورتی که سطح روغن پایین تر از مقدار min باشد، حتماً مقداری روغن به آن اضافه شود. البته قابل توجه است که زیاد بودن روغن نیز به موتور آسیب می‌رساند.

حتی وقتی از موتور استفاده نمی‌شود، روغن موتور آن فاسد و خراب می‌شود. پس باید به فاصله زمانی بین دو تعویض روغن که معمولاً شرکت سازنده موتور آن را تعیین می‌کند، توجه کرد. همچنین شرایط کاری و نوع موتور در این زمان مؤثر است. هنگام تعویض روغن، حتماً به سطح کیفی و گرید ویسکوزیته روغن مطابق با فصول سال توجه شود. استفاده از روغنی غیر از روغن ذکر شده در کاتالوگ، می‌تواند دلیلی بر فرسایش سریع قطعات همچون یاتاقان‌ها شود. (توصیه می‌شود همیشه از یک نوع روغن موتور استفاده شود، چون تعویض پی در پی نوع روغن، به دلیل تفاوت در فرمولاسیون آن‌ها ممکن است باعث واکنش شیمیایی و خوردگی در قطعات موتور شود.)

1-2-4 استفاده از فیلتر روغن استاندارد و تعویض دوره‌ای

یکی از وظایف روغن، جذب آلاینده‌ها، تعلیق ذرات حاصل از سایش و تعلیق دوده حاصل از احتراق است. برخی از آلاینده‌ها در روغن موتور به حالت تعلیق در می‌آیند و برخی دیگر بوسیله افزودنی‌ها جذب می‌شوند، روغن موتور در اثر این کارکرد در نهایت با آلاینده‌ها اشباع می‌شود و در نتیجه سایش در موتور اتفاق می‌افتد.

این آلودگی‌ها از راه‌های مختلف به درون موتور راه پیدا می‌کنند. عمده این آلودگی‌ها حاصل از باقی مانده‌های انفجار در قسمت بالای پیستون، آلودگی‌های گذر کرده از فیلتر هوا و وارد شده به درون موتور، جرم‌ها و کثافات باقی مانده از روغن‌های قبلی در موتور، پوسیدگی‌ها و زنگ زدگی‌های موجود در مسیر روغنکاری در موتورهای کهنه و براده‌های فلزات حاصل از سایشهای داخلی موتور می‌باشند.

این ذرات در ابعاد مختلف نقش مخربی خواهند داشت چرا که هر کدام از این ذرات در فشارهای بالای کارکرد موتور می‌توانند مانند یک سنگ الماس کوچک بر روی سطوح در تماس با

روغن و تحت فشار، براده برداری کرده و خراشهای ریز بوجود آورند. در اثر مرور زمان این خراشهای ریز بزرگ شده و آثار مخرب خود را در موتور آشکار خواهند نمود.

به طور مثال در صورتی‌که روغن موتور حاوی اینگونه ذرات به زیر یاتاقان میل‌لنگ برسد و در آن نقطه تحت فشار ناشی از انفجار، بین یاتاقان‌ها بلغزد با ایجاد خراش در زیر یاتاقان سطح صاف بین یاتاقان‌ها را به مرور از بین برده و محلی برای کاهش فیلم روغن زیر یاتاقان بوجود آمده و فیلم روغن در آن قسمت پاره خواهد شد. در این حالت رفتار اصطکاکی بین میل‌لنگ و یاتاقان، از حالت هیدرودینامیکی به حالت خشک رسیده و لغزش دو سطح فلزی بسیار سخت و با فشار زیاد بر روی هم خواهد بود که باعث بالا رفتن وحشتناک دما در آن نقطه خواهد شد. با بالا رفتن دما در آن محل تغییر شکل بسیار جزئی حاصل و بار دیگر خراش بزرگتر و فیلم روغن راحتتر پاره خواهد شد و مجدداً در اثر اصطکاک بالا حرارت بالاتر خواهد رفت، تا جایی‌که یاتاقان‌ها در اثر حرارت زیاد به هم بچسبند و اصطلاحاً موتور یاتاقان می‌زند.

با این توصیفات، مشخص است که وظیفه اصلی فیلتر روغن در مدار روغن‌کاری، تصفیه روغن قبل از رسیدن به یاتاقان‌ها و قسمت‌های در معرض اصطکاک موتور است. فیلتر روغن باید بصورت دائمی در سیکل روغن‌کاری بوده و بتواند تمام جریان روغن را از خود عبور دهد. اما فیلترها فقط تا مدت معینی می‌توانند وظیفه خود را به خوبی انجام دهند. در صورت عدم تعویض به موقع فیلتر روغن؛ منافذ کاغذ فیلتر مسدود می‌شود که در این حالت به دلیل بالا رفتن فشار در محفظهٔ فیلتر روغن سوپاپ اطمینان تعبیه شده در آن باز شده و جهت جلوگیری از آسیب دیدگی کلی قطعات پیشرانه اجازه عبور روغن بدون پالایش را به سیکل روغن‌کاری می‌دهد که این موضوع موجب بروز مشکلات جدی در قطعات حساس پیشرانه می‌شود.

انتخاب روغن موتور و فیلتر روغن و زمان تعویض آن باید بر اساس توصیه‌های سازنده موتور و اطلاعات ارائه شده در دفترچه راهنمای آن صورت گیرد و باید به این نکته نیز توجه شود فیلتر جدید طبق توصیه‌های سازنده فیلتر نصب شود. در انتخاب فیلتر متناسب با موتور باید به فاکتورهایی چون ظرفیت، راندمان فیلتر و دبی فیلتر توجه شود. توصیه سازندگان در تعویض فیلتر روغن با هر بار تعویض روغن یا یکبار در میان، است.

1-2-5 حذف احتمال جرقه

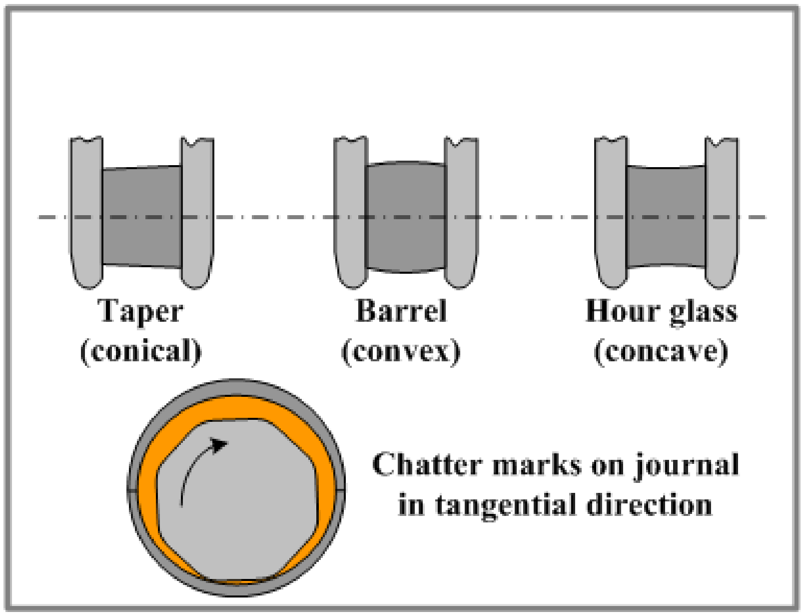
هنگامی که یک جریان نشتی در یک موتور از مسیر یاتاقان‌ها بعنوان مسیری براي تخلیه به زمین استفاده کند، می‌تواند منجر به ایجاد جرقه در داخل یاتاقان میل‌لنگ می‌گردد. هرگونه اختلاف پتانسیل بین یاتاقان و میل‌لنگ وجود داشته باشد، جرقه‌های الکتریکی که غالبا بصورت نقطه‌اي مي باشد گسترش می‌یابند (حتی اختلاف اندک در ولتاژ). انرژی الکتریکی تخلیه شده از میان سطح تماس فیلم روانکاری ایجاد گرما مي‌کند باعث ذوب نقطه‌ای سطحی میل‌لنگ یا یاتاقان می‌گردد. بعضی سطوح کنده شده و خرده‌های ریز جدا شده و می‌تواند موجب کاهش عمر میل‌لنگ و بقیه قطعات موتور گردد.

با کشف عبور جریان الکتریکي از یاتاقان‌ها، بهترین کار براي کمترین آسیب به میل‌لنگ، انتقال جریان از مسیر دیگري غیر از یاتاقان و میل‌لنگ می‌باشد که ارتباط دادن موتور به زمین، می‌تواند بصورت موثری ایم مشکل را رفع کند.

1-2-6 بازرسی میل‌لنگ از سه منظر در تعمیرات دوره‌ای

سطح محورهاي میل لنگ براي وجود تغییر شکل، سایش و خرابي در اثر ضربه بازرسي شود. قطر محور میل‌لنگ در دو جهت عمود بر هم و چهار ناحیه اندازه‌گیري شود و حداکثر مقدار سایش محور را به دست آید. همین کار برای یاتاقان‌های متحرک

و سطوح آببند سر و ته میللنگ صورت گیرد. تابیدگی میللنگ در محل یاتاقان‌های اصلی اندازه‌گیری شود. در صورت عدم تطابق هر یک از این پارامترها با مقادیر مجاز دفترچه راهنما، ضروری است که میللنگ از روی موتور پیاده‌سازی شده و به کارگاه جهت تعمیر ارسال شود. این عدم تطابق‌ها می‌تواند باعث تغییر در رفتار اصطکاکی میللنگ شده و در فاصله کوتاهی، آسیب جدی به میللنگ یا کل موتور وارد کند.



شکل 11: بازرسی ظاهری میللنگ

پارامتر مهم دیگر اندازه‌گیری صافی سطح است. در صورت تغییر این پارامتر، اصطکاک در این محل می‌تواند بالا رفته و موجب افزایش موضعی دما در این نقطه و از بین رفتن فیلم روغن گردد.

عامل دیگر که باید مورد اندازه‌گیری قرار گیرد، سختی سطح یاتاقان‌ها است. عواملی همچون گرادیان دمایی می‌تواند سختی‌زدایی کند. در این حالت سطح مستعد ساییدگی در اثر ناخاصی‌های موجود در روغن، ایجاد ترک و نهایتا شکست است. بنابراین، اندازه‌گیری سختی در بازدیدهای دوره‌ای ضروری به نظر می‌رسد.

1-2-7 تعویض دمپر ارتعاشی در هر دوره

اگرچه سهم تنش پیچشی وارد به میل‌لنگ از سهم تنش خمشی وارده کمتر است (در موتورهای دور پایین)، اما با این حال در بعضی از دور و بارها، تا 30% بار کل، ناشی از ارتعاشات پیچشی وارد به میل‌لنگ است. امروزه اکثر موتورهای توان بالا، از دمپر ارتعاش پیچشی جهت جذب ارتعاشات میل‌لنگ استفاده می‌کنند. شکل زیر نشان می‌دهد که فنریت قطعه جاذب توسط یک قطعه لاستیکی بدست آمده است.

شکل 12: نمونة یک دمپر ارتعاشی میل‌لنگ

بارهای نوسانی همراه با افزایش دما موجب کاهش چسبندگی و اتصال این قطعه با رینگ فلزی خود می‌شود. در این صورت، کارآیی دمپر ارتعاشی کاهش یافته یا کلا از بین می‌رود و تنش‌های وارده به میل‌لنگ افزایش یافته و می‌تواند احتمال آسیب دیدگی میل‌لنگ را افزایش دهد. قیمت بسیار کمتر این قطعه نسبت به قیمت میل‌لنگ، موجب شده تا اکثر سازندگان (مثل Caterpillar) پیشنهاد دهند که در هر تعمیر دوره‌ای، این قطعه تعویض شود.

1-2-8 تعویض تعدادی از قطعات در هر تعمیر دوره ای

بعضی از قطعات همچون پوسته یاتاقان‌ها در تماس مداوم با میل‌لنگ هستند و هر گونه خرابی احتمالی در این قطعات، می‌تواند سلامت میل‌لنگ به عنوان قطعه‌ای گران را به خطر بیاندازد. به این علت اکثر سازندگان موتور سنگین توصیه به تعویض قطعات زیر در هر تعمیر دوره‌ای یا حتی هر بازوبست دارند.

- یاتاقان‌های محور اصلی میل‌لنگ
- یاتاقان‌های متحرک
- آببند سر و ته
- بغل یاتاقانی

1-3 بخش سوم: انواع تنشهای وارده به میل-لنگ

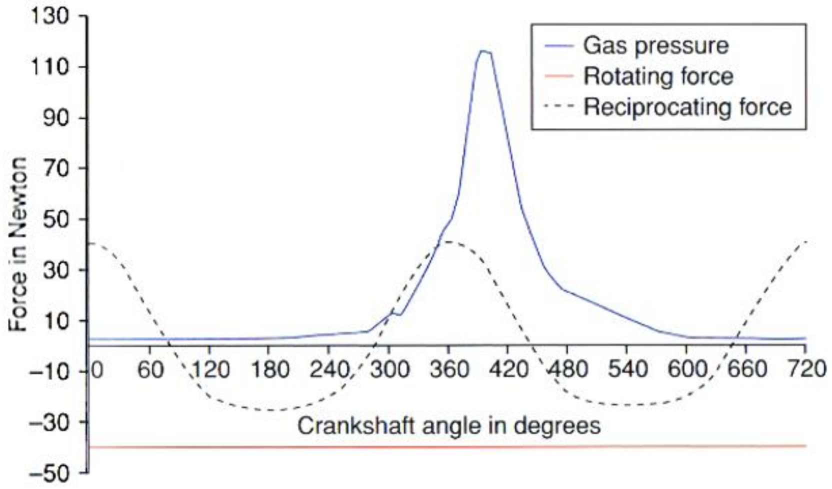
میل‌لنگ همواره در معرض اعمال بارهاي متنوع، بزرگ، آني و متغيّر است و همين موضوع طراحي، مدلسازي و افزايش طول عمر آنرا با مشكلات زيادي روبرو ساخته است. علاوه بر همه عوامل ياد شده تغييرات وضعيت موتور نيز سبب اعمال بارهاي مختلف به ميل‌لنگ مي‌شود كه پيش‌بيني آنها بسيار مشكل است. منبع اصلی همه نیروهای وارد بر میل‌لنگ، فشار ناشی از احتراق است. در یک موتور تنفس طبیعی به صورت سرانگشتی این فشار حداکثر 100 بار و در یک موتور توربوشارژ این عدد می‌تواند به 200 بار هم برسد. نیروی حاصل از این فشار، همچنین متناسب با مساحت سطح مقطع پیستون نیز می‌باشد. نیروی منتجه، به دو صورت ممان خمشی و ممان پیچشی به

میل‌لنگ اعمال می‌شود که اولی موجب تنش کششی-فشاری و دومی ایجاد تنش برشی در میل‌لنگ می‌شود.

اگرچه منبع دیگری از نیرو می‌تواند میل‌لنگ را تحت تنش قرار دهد که ناشی از شتاب پیستون است. ترکیبی از جرم پیستون، رینگها، گژن پین، خارها، جرم متمرکز شاتون در چشم کوچک و مقدار کمی روغن، به صورت مداوم از سرعت صفر به یک سرعت بسیار زیاد در فاصله زمانی کوتاهی، شتاب میگیرد. این اتفاق دوبار در هر گردش میل‌لنگ اتفاق می‌افتد. نیروی اینرسی حاصل متناسب با مقدار جرم این قطعات و شتاب ذکر شده است.

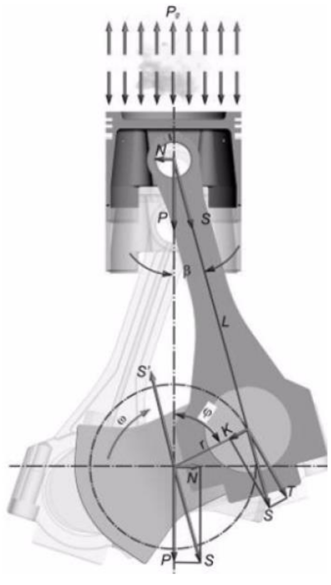
$$P_{Total} = P_{Gas} + P_{Reciprocating\ mass}$$

علاوه بر این دو نیرو، نیروی گریز از مرکز، ناشی از جرم‌های دورانی است که در یک سرعت دورانی ثابت، مقدار معین و ثابتی دارد که متناسب با ممان اینرسی دورانی میل‌لنگ و سرعت دورانی میل‌لنگ است. این جرمهای دورانی شامل وزن متمرکز شاتون در چشم بزرگ، یاتاقان شاتون، جرم یک وب از میل‌لنگ و مقداری روغن موجود در این مسیر است. این در حالتی است که جرم‌های دورانی به صورت کامل بالانس شده باشند، اگرچه بیشتر طراحی میل‌لنگ‌ها به منظور کاهش نیروی ماکزیمم، با فرض بالانس جرمی 60% تا 70% انجام می‌شود.



شکل 13: نیروهای اعمالی وارد شده به میل‌لنگ

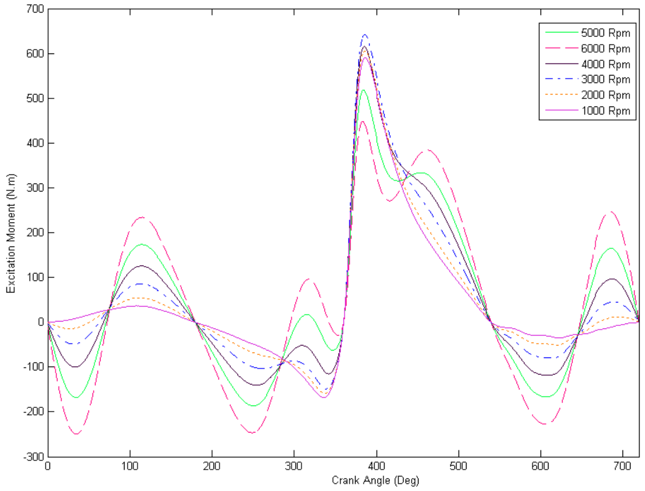
باید توجه داشت که این نیروها (نیروی فشار گاز و نیروی اینرسی قطعات رفت و برگشتی) علاوه بر آنکه به میل‌لنگ اعمال می‌شود به شاتون، یاتاقان‌ها و بدنه بلوک موتور نیز اعمال می‌شود.



شکل 14: انتقال نیروها از پیستون به میل‌لنگ

نیروی بوجود آمده از طریق شاتون، به یاتاقان متحرک میل‌لنگ می‌رسد (S) که می‌توان آن به دو مولفه شعاعی (K) و مولفه مماسی (T) تجزیه کرد که نسبت آن‌ها با تغییر زاویه چرخش میل‌لنگ تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که این نیروها

نسبت به سرعت دورانی و زاویه میل‌لنگ، متغیر هستند. همانطور که شکل زیر نشان می‌دهد، نیروهای غالب در سرعت‌های کم، نیروی فشار گاز است، در صورتی که در سرعت‌های زیاد، نیروی اینرسی جرم‌های رفت و برگشتی به مرور غالب می‌گردند.



شکل 15: منحنی حاصلجمع دو تحریک در شش دور مختلف

1-3-1 تنش خمشی

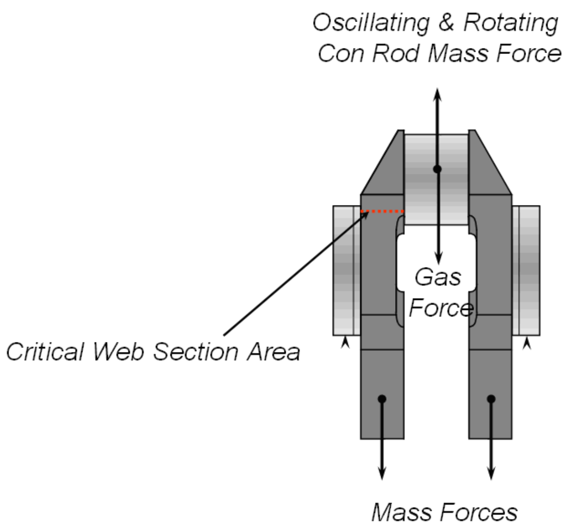
مولفه شعاعی (K) که در امتداد شعاع دوران میل‌لنگ است می‌تواند موجب ایجاد گشتاور خمشی و نهایتاً تنش کشش و فشاری شود.

$$M_B = F_b . l = \frac{P_{Total}}{\cos\beta} . l . \cos(\varphi + \beta)$$

مطابق با شکل (14) l فاصله محل اعمال نیروها تا تکیه‌گاه یاتاقانی است. حال با توجه به گشتاور خمشی، تنش خمشی ناشی از آن با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود قابل محاسبه است. به صورت سرانگشتی می‌توان گفت:

$$\sigma = \frac{M_B}{I/_c}$$

که برای ضعیفترین سطح از نظر خمش بدست می‌آید. این صفحه محل اتصال فیلت یاتاقان متحرک به یاتاقان ثابت است.



شكل 16: توزيع گشتاور خمشی

1-3-2 تنش پيچشي

مولفه مماسی (T) که موجب چرخش میللنگ است عامل ایجاد حرکت دورانی است و در اثر این گشتاور پیچشی، ایجاد تنش برشی در میللنگ میکند. این نیرو باعث بوجود آمدن تنش پيچشي (تنش برشي ناشي از پيچش) در ياتاقانهاي ثابت ميللنگ و تنش برشي در ياتاقانهاي متحرك يا ياتاقانهاي ثابت آن ميشود. وبهاي ميللنگ نيز ناگزير از تحمل اين نيرو هستند و بحرانيترين نقاط از نظر ميزان تنش مربوط به محل اتصال همين قسمت از ميللنگ با ياتاقان متحرك ميباشد.

$$M_T = F_t . r = \frac{P}{\cos\beta} . r . \sin(\varphi + \beta)$$

حال با توجه به معین بودن گشتاور خمشی، تنش برشی ناشی از آن با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود قابل محاسبه است. به صورت ساده میتوان گفت:

$$\tau = \frac{M_T}{J/_c}$$

که برای ضعیفترین سطح از نظر پیچش بدست میآید که ضعیفترین نقطه یاتاقان متحرک یا یاتاقان ثابت است.

علاوه بر گشتاور پيچشي لازم براي تحريك موتور، اثر ناخواسته ديگري نيز باعث بوجود آمدن پيچش و در نتيجه تنشهاي برشي در قطعات مختلف ميللنگ ميشود كه اثر مهم ارتعاشات بر اثر اعمال بارها و تحريكهاي دائمي ميباشد. از آنجا كه اندازه تنشهاي بوجود آمده بر اثر ارتعاشات پيچشي بزرگترين اعداد را در مقايسه با ساير عوامل تنشزا حتي نظير ارتعاشات عرضي، به خود اختصاص ميدهند بررسي ارتعاشات پيچشي و ارائه راهحلهايي براي به حداقل رسانيدن آنها، از ديرباز مد نظر متخصصان بوده است. مشكلات زيادي بر اثر ارتعاشات پيچشي در ماشينهاي رفتوبرگشتي و دوراني بوجود مي آيد.

در نهايت تنش منتجه در نقاط پرخطر غالبا از رابطه فون ميزس استخراج شده و با تنشهای مجاز قطعه، مقايسه میگردند.

$$\sigma_v = \sqrt{3 \cdot (\alpha_T \cdot \tau_T)^2 + (\alpha_b \cdot \sigma_b)}$$

1-3-3 كنترل تنشهای وارده به ميللنگ

بايد توجه داشت كه تغييرات اين نيروها (نه خود نيروها)، منبع اصلی ارتعاشات بوجود آمده در موتور است. اين تحريكها نيز در صورت هم فركانسی با فركانسهای اصلی ميللنگ ميتواند موجب تغيير شكلهای زيادتر و نهايتاً تنشهای جديد و بيشتری گردد. از ميان انواع ارتعاشات ايجاد شده، نوع پيچشي آن كه هيچگونه علائم خارجي نيز از خود نشان نميدهد، از بقيه مخربتر است. بهعلاوه در شرايط يكسان معيارهاي لازم براي جلوگيري از آسيبزايي در مورد ارتعاشات پيچشي، موقعيتهاي پايينتري را در مقايسه با ارتعاشات خمشي در طيف فركانسي اشغال ميكنند. مضاف بهاينكه حد تحمل خستگي براي ارتعاشات پيچشي پايينتر از همين مقادير براي ارتعاشات خمشي ميباشد. بالاخره اينكه ارتعاشات خمشي را ميتوان با تكنيكهاي سادهاي مانند وزنهاي بالانسكننده مهار

کرد. در ضمن کاهش ارتعاشات پیچشي با طراحي دقیق جاذب ارتعاشات پیچشی میسر است.

1-4 معرفی فرآیندهای مجاز جوشکاری برای مرمت میل‌لنگ‌ها

ترک، خوردگی و سایش یاتاقان‌های ثابت و متحرک میل‌لنگ، از جمله معایبی است که در موتورهای سنگین و نیمه سنگین دیزلی به کرات دیده میشود و باعث از رده خارج شدن آنها می‌گردد که این خود خسارت و هزینه بسیار سنگینی را ایجاد میکند. علت بوجود آمدن آن می‌تواند وجود بارهای ناگهانی ناشی از بدسوزی یا احتراق زودرس (فشار احتراق بالا)، سایش در اثر عدم کفایت روغن در محل‌های تماس، براده فلز یا ذرات ساینده خارجی و ... باشد.

بنابراین وقتی موتور برای تعمیرات اساسی بازوبست می‌شود، بازسازی سطوح یاتاقان‌های متحرک و ثابت میل‌لنگ از فعالیت‌های اصلی می‌باشد. بازسازی یاتاقان‌های ساییده شده و دارای ترک سطحی میل‌لنگ عموماً توسط فرآیند سنگزنی به مفهوم کاهش قطر یاتاقان‌ها انجام می‌شود. این فرآیند به منظور دستیابی به سطحی با کیفیت سطح، سختی، اندازه و تلورانس‌های ابعادی و هندسی مطلوب، انجام می‌شود. سنگزنی مجاز هر میل‌لنگ عموما توسط سازنده آن مشخص می‌شود و به ازای هر اندازه مجاز، پوسته یاتاقان منطبق با آن ارائه می‌شود. این پوسته‌ها بیشتر در بیش اندازه[1] $0.25\,mm, 0.5\,mm, 0.75\,mm$ ارائه می‌شود. بنابراین حداکثر میزان مجاز سنگزنی این میل‌لنگ حداکثر $0.75\,mm$ است. حال اگر ساییدگی بیش از این مقدار باشد یا وجود ترک با عمقی بیش از این مقدار باشد، امکان سنگزنی بیشتر وجود ندارد. از طرفی سفتی خمشی میل‌لنگ با توان

[1] Oversized

چهارم قطر (d^4) متناسب است و کاهش قطر تأثیر شدیدی بر کاهش سفتی میل‌لنگ دارد.

در این حالت راه حل اساسی در تعویض میل‌لنگ است اما گاهی به علت هزینه‌های بالای تأمین و تعویض میل‌لنگ، بازسازی میل‌لنگ به مفهوم جوشکاری و با هدف کاهش هزینه‌ها توصیه می‌شود. اگرچه طبق استانداردهای ارائه شده توسط DNV یا ABS وجود هرگونه آثار حرارتی و یا جوشکاری در میل‌لنگ باعث اسقاط آن می‌شود و نمی‌توان سایش و خوردگی را با عملیات جوشکاری ترمیم کرد، اما در عمل بعضی از سازندگان میل‌لنگ، استفاده از جوشکاری را با شرایط خاصی مجاز دانسته‌اند. بطور مثال در مرجع [4] متعلق به شرکت ESAB برای شفت‌های دچار سایش پروسه‌ای ارائه کرده است که می‌توان با تغییراتی در مورد میل‌لنگ آن را انجام داد.

روش‌هایی که امروزه به صورت عملی، برای بازسازی میل‌لنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند به شرح زیر است.

1- جوشکاری با الکترود دستی پوشش‌دار[2] (SMAW)
2- جوشکاری قوس تنگستن[3] (TIG)
3- جوشکاری زیر پودر[4]
4- پاشش حرارتی[5]
5- پوشش لیزری[6]

در هر یک از فرآیندهای فوق، پیش از شروع بازسازی میل‌لنگ، سطح سائیده شده یا آسیب دیده باید به صورت کامل پاکسازی شود تا جوش به اندازه کافی در سطح یاتاقان نفوذ کند. در ضمن باید قبل از فرآیند جوش، سطح قطعه ماشینکاری شود. در ضمن از پرشدگی سوراخ روغن یاتاقان‌ها محافظت شود. این امر با استفاده از درپوشهای کربنی یا سرامیکی در

[2] Shielded Metal Arc Welding
[3] Tungsten Inert Gas
[4] Submerged Arc Welding
[5] Thermal Spraying
[6] Laser Cladding

ورودی سوراخ‌های روغن انجام می‌شود. بعضی دیگر، فرآیند جوش را چنان کنترل می‌کنند که هنگام رسیدن به سوراخ، فرآیند متوقف می‌شود.

در ضمن برای انجام فرآیند در هر یک از روشهای فوق، ماشین خاصی شبیه به ماشین سنگزنی میل‌لنگ مورد استفاده است که دارای دو سه نظام در ابتدا و انتهای دستگاه است به شکلی که این سه نظام‌ها قابلیت خارج از محوری دارند. این ویژگی موجب می‌شود تا علاوه بر گردش حول محور اصلی میل‌لنگ، گردش حول محور یاتاقان‌های متحرک نیز میسر گردد. با این روش امکان جوشکاری محور متحرک، همچون محور اصلی، ممکن شود.

جوشکاری پیوسته با هر یک از روشهای فوق برای ترمیم سطوح آسیب دیده یا ساییده شده به شکل افزایش ابعاد قطعه با حداقل گرمای ورودی به قطعه صورت می‌گیرد. این فرآیند به صورت چرخش پیوسته میل‌لنگ و سرعت قابل کنترل به نحوی انجام می‌شود که ماشین‌کاری به مقدار حداقل باشد. تغییر شکل قطعه عموماً ناشی از تنش توزیعی ناهمگن در قطعه است که این امر به علت عدم انتشار یکنوخت گرما در میل‌لنگ است. برای رسیدن به کمترین مقدار گرمای ورودی به قطعه، سرعت سطحی جوش باید به مقدار بیشینه و قطر مفتول و جریان الکتریکی جوش به حداقل برسد. شکست در رسیدن به این اهداف، می‌تواند منجر به ایجاد تخلخل در جوش و تغییر ساختار متالوژیکی میل‌لنگ شود.

روشهای متفاوتی برای کاهش ورود حرارت به میل‌لنگ مورد بررسی واقع شده است. در صورت کوچک بودن قطعه، می‌توان آنرا در تماس با یک جسم بسیار سرد قرار داد تا قطعه دوم، گرما را به شدت جذب کند و مانع انباشت گرما در قطعه شود. اما عموما میل‌لنگ‌های بزرگ را پیشگرم می‌کنند تا به علت حضور گرما در قطعه، گرمای جدید با شدت کمتری به قطعه وارد شود. میل‌لنگ‌های فولادی را غالباً تا $250-300\,^{\circ}\mathrm{C}$ گرم می‌کنند، در

صورتی که برای میللنگهای چدنی با قابلیت جوش را تا $50-60\,^{\circ}\mathrm{C}$ پیش گرم میکنند.

انتخاب فرآیند جوشکاری و جنس الکترود باید با توجه به نوع میللنگ (چدن ریختگی یا فولاد آهنگری 4340) خواص آن انتخاب شود که شامل سختی سطح بدست آمده،کیفیت اصطکاکی سطح، ساختار متالوژیکی ایجاد شده (آستنیتی یا مارتنزیتی)، مقاومت در مقابل سایش، مقاومت در برابر حرارت و مقاومت در برابر خوردگی، ایجاد تنشهای پسماند، حداکثر دمای ایجاد شده در میللنگ است. مسلماً این پارامترها باید برابر با ماده اصلی میللنگ یا بهتر از آنها باشند.

1-4-1 جوشکاری با الکترود پوششدار

این روش جوشکاري كه معمولترين و شايعترين نوع جوشکاري در صنعت میباشد، توسط الکترود کوتاه و روپوش دار انجام میشود كه به آن الكترود قلمی یا قدي يا شاخه اي گفته میشود. طول اين گونه الكترودها عموما 15 الی 45 سانتیمتر است اما جهت مصارف خاص طولهاي بلندتر نيز توليد میگردد. قطر الكترود نيز تابع نياز مصرف است، كه از 1.5 ميليمتر تا 6 ميليمتر مصرف عمومی دارد و گاهاً براي مصارف خاص قطرهاي ديگري نيز توليد میشود. اين الكترودها از دو قسمت متمايز تشكيل میشوند. يکی مغزي الكترود كه فلزی است و دوم پوشش الكترود كه مخلوطی از مواد شيميايی و معدنی است. در اين نوع جوشکاري، الكترود (بسته به نوع آن و نيز نوع دستگاه جوش مورد مصرف و جنس فلز پايه)، به يکی از قطبهاي مثبت و يا منفی دستگاه جوش وصل شده و قطب ديگر نيز به قطعه وصل میشود و قوس الكتريکی ميان الكترود و قطعه كار با نزديک كردن الكترود به قطعه كار ايجاد شده و عمل جوشکاري انجام میگردد.

برای جوشکاری یک میللنگ سبک با جنس چدن ریختگی EN-GJS-600-3 مطابق با استاندارد DIN EN 1564:2012 از این روش استفاده

شده است. با این روش، جریان $I_s = 100 - 140 / A$ با ولتاژ $U_a = 20 - 24 / V$ استفاده شده است. مفتول استفاده شده E10-UM-60-CZ مطابق با استاندارد DIN 8555 است. در این حالت سختی سطح ایجاد شده از ماده اصلی بیشتر است. خواص سطح نهایی جوش شده مطابق با جدول زیر است.

جدول 1: مشخصات الکترود

سختی سطح نهایی	59 - 63 / HRC
ساختار سطح	austenite with large Cr carbides
مقاومت در برابر خوردگی	خیلی خوب
مقاومت در برابر دما	700 ℃
مقاومت در برابر خوردگی	خیلی خوب
قابلیت ماشین‌کاری	خوب

شکل 17: جوش با الکترود پوششدار

مشخصات الکترود جوشکاری SAMW برای جوشکاری ترمیمی یک شفت توسط شرکت Esab AB به صورت زیر تعریف شده است.

جدول 2: مشخصات الکترود جوشکاری

OK 83.28 Basic DC+, AC	E 1-300	For build-up and support layer for harder deposits. Parts in rolling mills, grooved rolls and clutches, rails, rail points, cog wheels, links and rollers for tractors and bearing journals.	C Cr	0.1 3.2	**Hardness** a w = 30 HRC **Machinability** Good **Impact resistance** Very good **Metal-to-metal wear resistance** Very good	2.5 3.2 4.0 5.0 6.0

1-4-2 جوشکاری قوس تنگستن

جوشکاری تیگ (Tig) یا همان جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ، یکی از مهمترین روشهای جوشکاری در صنایع مختلف کوچک و بزرگ پتروشیمی، نظامی، دریایی، هوایی، نیروگاههای برق و ... می‌باشد. در ایران بیشتر با نام اختصاری و متداول جوش آرگون شناخته می‌شود. دلیل این نامگذاری بیشتر به خاطر استفاده از گاز آرگون در این فرایند جوشکاری است.

از فرایند جوشکاری TIG می‌توان برای جوشکاری فلزات سخت و غیر سخت، آهنی و غیر آهنی در تمام ضخامتها استفاده کرد. با استفاده از این نوع جوشکاری می‌توان جوشکاری صفحات نازک و ظریف (به عنوان مثال: آلومینیومی) تا لوله های تحت فشار را انجام داد. در این روش قوس و حوضچه مذاب کاملاً آشکار و قابل مشاهده می‌باشد. در دهه ۱۹۲۰ کوشش شد تا قوس و حوضچه مذاب را در مقابل اتمسفر محافظت کنند تا جوشکاری کاملاً ایده آل انجام گیرد. ظهور الکترودهای روپوش دار در آن دهه مسئله محافظت را منتفی کرد. اما بدلیل بوجود آمدن برخی مشکلات در دهه ۱۹۳۰، جوشکاری با گاز خنثی و الکترود تنگستن (TIG) ابداع شد که شروع روش جوشکاری با محافظت گاز بود. این روش با وجود اینکه بسیار کند پیشرفت کرد ولی در دهه ۱۹۴۰ توسعه پیدا نمود.

در این فرایند عمل جوشکاری توسط حرارت ناشی از قوس الکتریکی ما بین یک الکترود مصرف نشدنی از جنس تنگستن (یا آلیاژ آن) و قطعه کار صورت می‌پذیرد. الکترود، قوس الکتریکی و منطقه حوضچه مذاب توسط یک گاز محافظ (آرگون، هلیم، مخلوط هر دو گاز و یا مخلوط هر یک از دو گاز با گازهیدروژن) در برابر اتمسفر محافظت می‌شود. استفاده از گازهای آرگون و هلیم به علت خاصیت خنثی بودن این گازها می‌باشد. گازهای خنثی با عناصر دیگر قابلیت واکنش ندارند پس به منظور حذف گازهای فعال مانند اکسیژن و نیتروژن از اطراف قوس و حوضچه مذاب، اکسیدها و نیتریدهای فلزی ایده آل می‌باشند بدین ترتیب می‌توان از شکل گرفتن (Porosity) تخلخلهای گازی جلوگیری نمود. تخلخلهای گازی، اکسیدها و نیتریدهای فلزی، عیوبی هستند که باعث کاهش خواص مکانیکی جوش از جمله مقامت به ضربه و استحکام کششی می‌شوند.

نتیجه انرژی حرارتی تولید شده در قوس در اثر دو عامل است : اول اینکه الکترونها در هنگام حرکت، انرژی خود را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کنند و دوم اینکه در اثر تصادم این ذرات با یکدیگر مقداری انرژی تولید می‌گردد و در نهایت در قوس الکتریکی در فشار یک اتمسفر درجه حرارتی حدود ۶۰۰۰ درجه سانتیگراد (در بخار آهن) تا ۲۰۰۰۰ درجه سانتیگراد (برای قوس تنگستن) ایجاد می‌شود.

عیوب ناشی از محافظت نامناسب گاز بوجود می‌آید شامل ناخالصی تنگستن، خلل وفرج (Porosity) ، فیلمهای اکسیدی در نتیجه ذوب ناقص و حبس ناخالصیهای اکسیدی که موجب کاهش خواص مکانیکی از جمله کاهش استحکام کششی و مقاومت به ضربه می‌شوند.

مفتول استفاده شده E10-UM-60-CZ مطابق با استاندارد DIN 8555 DIN 8555:WSG 3-GZ-55-T است.

شکل 18: جوشکاری محور متحرک میل‌لنگ با قوس تنگستن

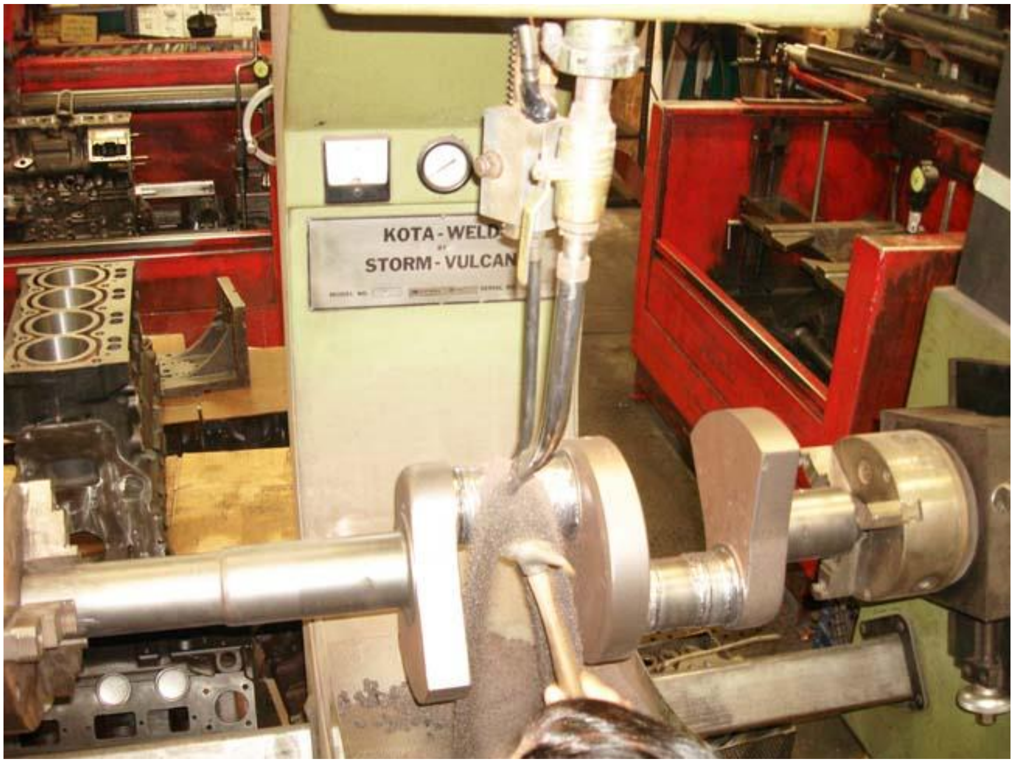
1-4-3 جوشکاری زیرپودر

جوش زیرپودر یک فرایند جوش قوس الکتریکی است که در آن گرمای لازم برای جوشکاری توسط یک یا چند قوس بین یک فلز پوشش نشده، یک یا چند الکترود مصرفی و یک قطعه کار تامین می‌شود. قوس توسط لایه ای از فلاکس پودری قابل ذوب شدن که فلز جوش مذاب و فلز پایه نزدیک اتصال را پوشانده و فلز جوش مذاب را از آلودگی‌های اتمسفر حفاظت می‌کند، پوشیده می‌شود.

جوش که ترکیبی از فلاکس مذاب و فلزجوش مذاب است می‌گذرد. فلاکس مذاب معمولاً، هادی خوب جریان الکتریسته است، در حالی که فلاکس سرد،دهادی نیست. پودر جوش می‌تواند اکسیدزداها و ناخالصی زداهایی که با فلز جوش واکنش شیمیایی می‌دهند را نیز تامین کند علاوه براینکه یک لایه محافظ ایجاد می‌کند. فلاکس‌های جوش زیر پودری فولادهای آلیاژی

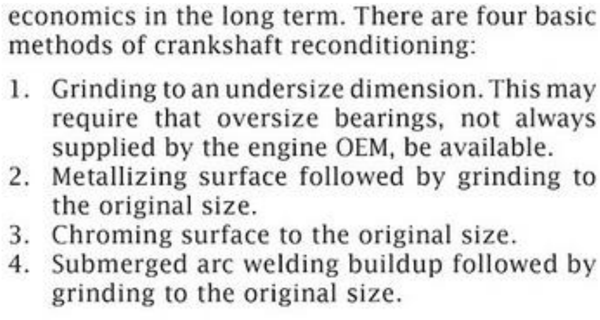
همچنین می‌توانند حاوی عناصر آلیاژی برای بهبود ترکیب شیمیایی فلز جوش باشند. جریان الکتریکی از یک ژنراتور (ترانسفورماتور یا رکتی فایر) تامین شده، از اتصالات عبور می‌کند تا قوسی را بین الکترود و فلز پایه بر قرار کند را ذوب می‌کند که حوضچه مذاب را برای پرکردن اتصال تشکیل دهند. درکلیه انواع تجهیزات، غلطک‌های هدایت با نیروی مکانیکی بطور پیوسته سیم الکترود مصرفی فلزی را از میان لوله تماس (نازل) و توده فلاکس به اتصالی که باید جوش شود می‌رانند. سیم الکترود عموما" یک فولاد کم کربن با ترکیب شیمیایی دقیق که در یک قرقره یا بشکه پیچیده شده می‌باشد. سیم الکترود در منطقه جوش ذوب شده و در طول اتصال رسوب می‌کند. فلاکس دانه ای در جلوی قوس ریخته شده و پس از انجماد فلز جوش، فلاکس ذوب نشده توسط سیستم مکش جمع کننده برای استفاده مجدد جمع آوری می‌شود. در جوش خودکار بازیابی فلاکس مجموعه‌ای از تجهیزات و یک لوله بازیابی فلاکس که درست پس از لوله تماس قرار گرفته است مي باشد.

جوش زیر پودری به هر دو روش نیمه خودکار و خودکار قابل انجام بوده و روش خودکار بخاطر مزایا بیشتر، استفاده گسترده تر دارد. فلاکس به عنوان اکسیدزدا و آخال زدا برای خارج کردن ترکیبات ناخواسته از حوضچه جوش عمل می‌کند تا جوش سالم و باخواص مکانیکی مناسب ایجاد کند. سیم‌های الکترود ارزان برای جوش فولادهای غیرآلیاژی و کم کربن استفاده می‌شوند. (معمولاً سیم‌های فولادی کم کربن بدون پوشش یا با پوشش نازک مسی برای هدایت بهتر و جلوگیری از خوردگی می‌باشند).



شکل 19: بازسازی محور متحرک میللنگ با روش جوش زیر پودر

عمده مطالعات و فعالیت‌های انجام شده در بهسازی میللنگ‌ها به این روش اجرا شده است و در کتابهای مرجع و کتابچه تعمیرگاهی بعضی از موتورها به صراحت از روش جوشکاری زیر پودر به عنوان تنها روش مجاز برای بازسازی میللنگ نام برده شده است. به صورت مثال Sean Bennett در کتاب خود [2] این روش را پیشنهاد کرده است:


economics in the long term. There are four basic methods of crankshaft reconditioning:

1. Grinding to an undersize dimension. This may require that oversize bearings, not always supplied by the engine OEM, be available.
2. Metallizing surface followed by grinding to the original size.
3. Chroming surface to the original size.
4. Submerged arc welding buildup followed by grinding to the original size.

یا شرکت Caterpillar برای موتور تجاری D330TA خود تنها این روش را برای بازسازی میل‌لنگ خود می‌پذیرد:

c. Crankshaft Rehabilitation.

(1) Crankshaft journals will be rehabilitated by the metalizing, chromeplating, or submerged arc welding process and finished to the original dimensions. Method of rehabilitation will be determined by authorized inspection personnel after considering cost, availability of facilities, and serviceability of method.

1-4-4 فرآیند پاشش حرارتی

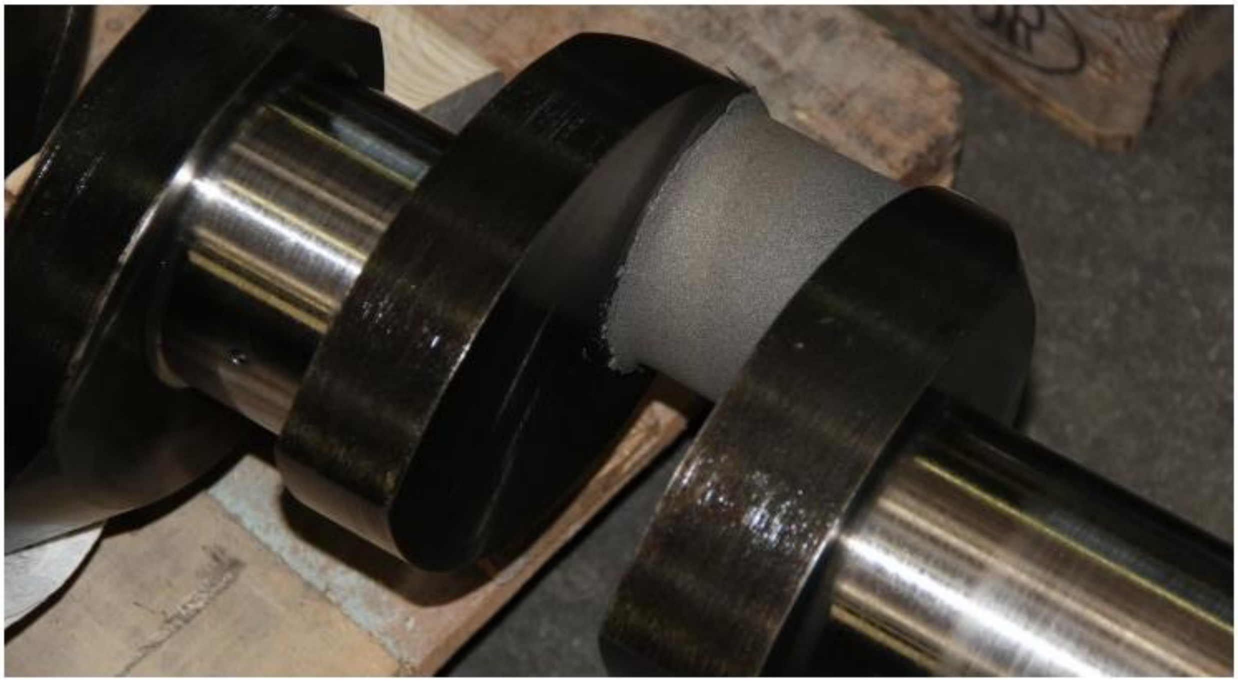
فرآیند پوشش و ترمیم قطعات به روش پاشش حرارتی برای اولین بار درسال 1910 میلادی توسط چوپ (Schoop) در کشور سوئیس اختراع گردید. نظر به مزایای این روش درحال حاضر بعنوان یکی از کاربردی ترین روشهای پوشش دهی در ترمیم و افزایش مقاومت به سایش و خوردگی سطوح قطعات صنعتی بکار میرود.این روش که به روش جوش سرد نیز معروف است به دلیل عدم افزایش دمای سطح فلز پایه حداقل تاثیرات و تغییرات خواص متالورژیکی در قطعه را ایجاد می‌کند که میتوان برای ترمیم و بازسازی خوردگی یاتاقان‌های میل‌لنگ از آن استفاده کرد.

فرآیند متال اسپری برپایه پاشش فلز مذاب برروی سطح به منظور دستیابی به یک لایه مقاوم طرح ریزی شده است. مواد پوشش دهنده به فرم مفتول توسط شعله که معمولا شعله اکسی استیلن می‌باشد ذوب شده وسپس به وسیله هوای فشرده شده به شکل ذرات پاشش می‌شود. هنگامی‌که ذرات به سطح فلز پایه برخورد می‌کنند، قطرات ریز ذوب شده به سرعت منجمد و پوشش را تشکیل می‌دهند. فرآیند متال اسپری یک فرآیند سرد نامیده می‌شود چراکه درجه حرارت سطح فلز پایه درحین فرآیند پائین نگه داشته شده و مانع از تغییرات متالورژیکی و اعوجاج در قطعه می‌شود. از این فرآیند چه درگذشته و چه درحال حاضر به شکل گسترده در قطعات و اجزاء ماشین و پوشش‌های مقاوم به خوردگی استفاده می‌شود.

به منظور پیوستگی و استحکام قطعه و مقاومت در مقابل بارهای وارده در جهت محوری قبل از عملیات پاشش سطح مورد نظر تحت عملیات خشن تراشی (شیارهای منظم) قرار می‌گیرد. در ابتدا و انتهای طول خوردگی بر روی محور لبه سازی می‌شود که از حرکت و پوسته شدن ذرات تحت فشار انطباق جلو گیری کند. نهایت عمق باربرداری با توجه به حد استاندارد ضخامت پوشش، کمتر از 2 میلیمتر در قطر می‌بایست باشد. سپس برای از بین بردن چربی و آلودگی‌های سطحی از حلالهایی چون تینر استفاده

می‌شود و جهت رطوبت زدایی و قابلیت پذیرش ذرات توسط سطح قطعه لازم است قبل از عملیات پاشش، پیش‌گرم شود که نهایت دما از 50 درجه سانتیگراد نبایست بیشتر شود.

قبل از عملیات پوشش دهی لازم است عملیات پوشش آستر توسط مفتول‌های باندینگ به منظور نزدیک شدن خواص متالورژیکی لایه‌های غیرهمجنس و همچنین افزایش کیفیت لایه پوشش نهائی برروی سطح انجام گیرد. پس از ایجاد لایه آستر، پوشش نهائی متناسب با نوع لایه مورد نظر پاشش می‌شود. ضعف روش اسپری این است که حداکثر نیم میلیمتر پوشش می‌توان ایجاد کرد که برای خوردگی‌ای عمیق یاتاقان میل‌لنگ مناسب نمی‌باشد.. این فرآیند شکل‌های متفاوتی همچون روش اسپری شعله‌ای، اسپری با تفنگ انفجاری، پوشش دهی با قوس الکتریکی، روش پلاسما اسپری، روش اسپری گرم، روش اسپری سرد دارد که برای پوشش یاتاقان شفت‌ها و یاتاقان میل‌لنگ از آن استفاده شده است.

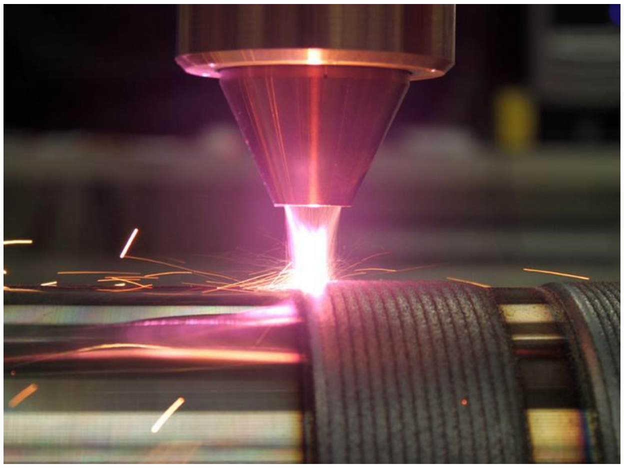


شکل 20: بازسازی یاتاقان متحرک به روش پاشش حرارتی

شکل 21: بازسازی یاتاقان متحرک به روش پاشش حرارتی

1-4-5 روکش کاری لیزری

می‌توان گفت روکش کاری لیزری در هرجایی که به محافظت از قطعات در برابر خوردگی، استهلاک، سایدگی، زنگ زدگی و ایجاد حفره نیاز است، کاربرد دارد. روکش کاری لیزری نوعی آلیاژسازی سطحی با استفاده از لیزر می‌باشد. در این فرایند لایه‌ای از یک ماده را به طور دقیق بر روی اجسام نشانده که این عمل سبب افزایش مقاومت در برابر خوردگی و زنگ زدگی بدون القای مغناطش می‌گردد. گسترش فلزات سخت جدید و آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی سبب کاربرد بیشتر روکش کاری (آبکاری) لیزری گردیده است. در طی این فرایند یک لایه از آلیاژ بر روی ماده پایه توسط لیزر ذوب می‌شود، البته با حداقل میزان ذوب ماده پایه. و بین دو ماده پیوند جامد تشکیل می‌شود. این عمل مشابه جوشکاری می‌باشد که با اعمال لیزر و ذوب دو ماده، مابین آنها پیوند متالوژیکی تشکیل شده و با یکدیگر آمیخته می‌شوند. در گذشته ایجاد یک لایه سخت به روش سنتی بسیار زمان بر بود و سبب ایجاد ناهمواری در سطح می‌گردید. همچنین در روشهای سنتی لازم بود تا چند لایه برروی یکدیگر قرار گیرند که این امر موجب ضخیم شدن سطح می‌گردید. مزیت‌های این نوع پردازش نسبت به سایر روشها عبارت است از: ۱- دقت بالا و لایه نشانی با ضخامت دلخواه از ۰/۱ میلیمتر تا چند سانتیمتر ۲-ایجاد پیوند متالوژیکی بین ماده روکش و ماده پایه ۳-کم بودن انرژی و گرمای منتقل شده به ماده پایه ۴-امکان گسترده برای انتخاب از میان مواد پودری همگن و غیر همگن ۵-امکان پردازش هر ماده دلخواه ۶- ارزان تر بودن نسبت به سایر روشها



شکل 22: جوشکاری به روش پوشش لیزری

مهمترین استفاده از این روش در بخش‌های صنعتی چون ساخت کارخانه‌ها، مهندسی و ساخت ماشین‌آلات مختلف، هواپیما، خودرو و ... می‌باشد. روکش‌کاری می‌تواند برای ایجاد یک لایه سطحی کاملاً جدید و یا ترمیم بخش‌های آسیب دیده مورد استفاده قرار گیرد. به طور مثال از این روش می‌توان برای روکش‌کاری تثبیت کننده و یا سایر اجزای دریل که از استیل غیر مغناطیسی ساخته شده‌اند، استفاده کرد. همچنین از این روش می‌توان برای روکش کاری اجسام با شکل هندسی پیچیده و سه‌بعدی نیز استفاده کرد. روکش‌کاری لیزری فرآیندی پیچیده شامل پارامترهای مختلفی از قبیل اندازه موضعی پرتو، میزان سرعت تامین و جریان تزریق پودر و... می‌باشد که با تغییر آن‌ها می‌توان میزان سرعت و نتیجه نهایی کار را بهبود بخشید. به طور مثال سرعت روکش‌کاری در حدود چند سانتی متر مربع در دقیقه برای لایه‌هایی با ضخامت ۱ میلیمتر می‌باشد.

شکل 23: روکش‌کاری لیزری یاتاقان متحرک میل‌لنگ

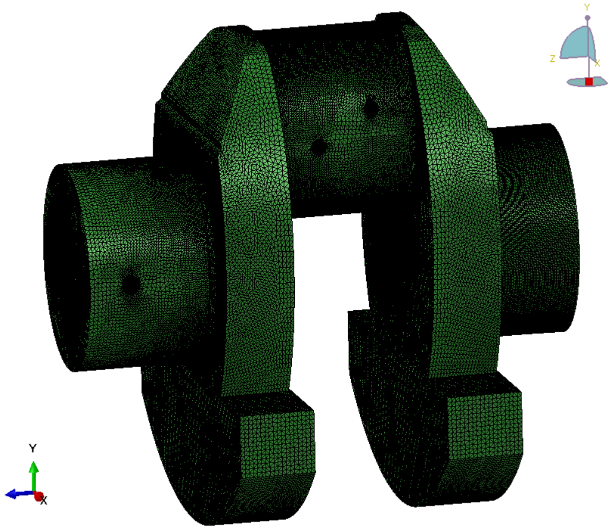
روکش‌کاری لیزری معمولاً به صورت تک مرحله‌ای (اعمال ماده روکش در حین فرایند از طریق پودر یا مفتول) یا دو مرحله‌ای (اعمال ماده روکش و ایجاده پلاسما از طریق تابش و ذوب دوباره توسط لیزر) انجام می‌شود. لیزر سبب ایجاد یک استخر مذاب به همراه گاز داخلی می‌گردد. برای پوشش دادن یک منطقه وسیع لیزر باید مسیرهای هم پوشانی شده را دنبال کند. ضخامت لایه نهایی ایجاد شده معمولاً ۱-۲ میلیمتر می‌باشد. گرچه در این روش به سبب دمای بالای موضعی ایجاد شده توسط لیزر و یا مدت زمانی که لازم است تا لیزر مسیرهای چندگانه هم پوشانی شده را در یک منطقه گسترده طی کند، به ماده پایه استرس وارد می‌شود اما این گرما از میزان گرمایی که در روش‌های سنتی لایه نشانی چند لایه ایجاد می‌شد کمتر می‌باشد. فرآیند روکش‌کاری دو مرحله‌ای معمولاً برای سطوح صاف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1-4-6 بررسی توزیع تنش در میل لنگ مورد بررسی

برای بررسی توزیع تنش در میل لنگ مورد بررسی از تحلیل اجزاء محدود بهره گرفته شده است. بدین منظور بخشی از میل لنگ که بین دو یاتاقان ثابت قرار می گیرد و در طول میل لنگ تکرار می شود جهت تحلیل انتخاب گردید. برای حل اجزاء محدود از نرم افزار Abaqus استفاده گردید.

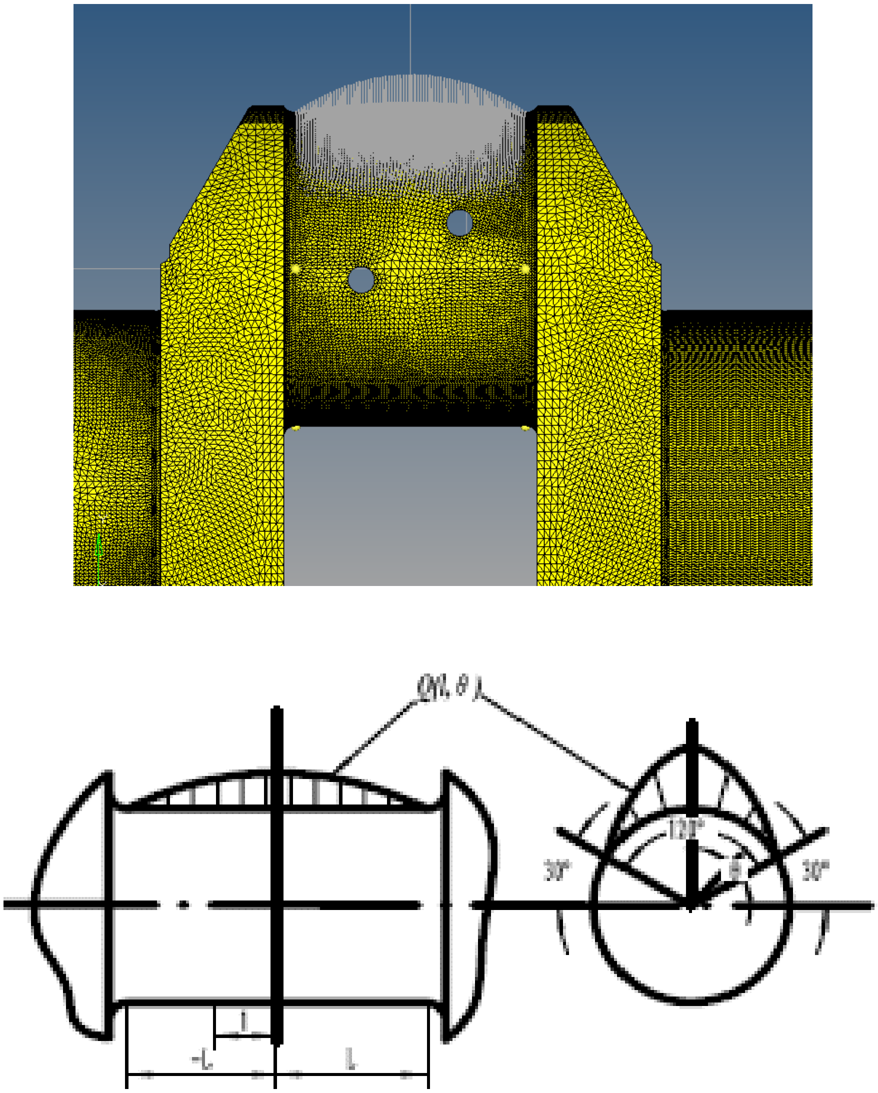
4-1-6-1 المان‌بندی و بارگذاری

برای المان‌بندی مدل مذکور از المان های درجه دوم از نوع C3D10M استفاده شده است. اندازه المانها در نواحی تمرکز تنش و اطراف سوراخها کوچک در نظر گرفته شده است تا تحلیل انجام شده بتواند گرادیان تنش در این نواحی را به خوبی محاسبه نماید. در مجموع تعداد المانهای به کار رفته 1.987.755 و تعداد گره ها 2.914.877 بر روی مدل ایجاد گردید. شکل 1 نمایی از مدل المان بندی شده را نشان می دهد.



شکل 24نمایی از مدل المان بندی شده

برای تعیین شرایط مرزی، سناریوی سخت ترین شرایط یعنی درگیر بودن کامل یک سمت مدل و عدم وجود نیروهای اینرسی درنظر گرفته شده است. بارگذاری ناشی از احتراق بر روی یاتاقان متحرک به صورت توزیع کسینوسی در جهت زاویه‌ای و سهوی در جهت طولی و با بیشینه تنش Qmax-combustion=25.2 Mpa در نظر گرفته شده است (شکل 2).



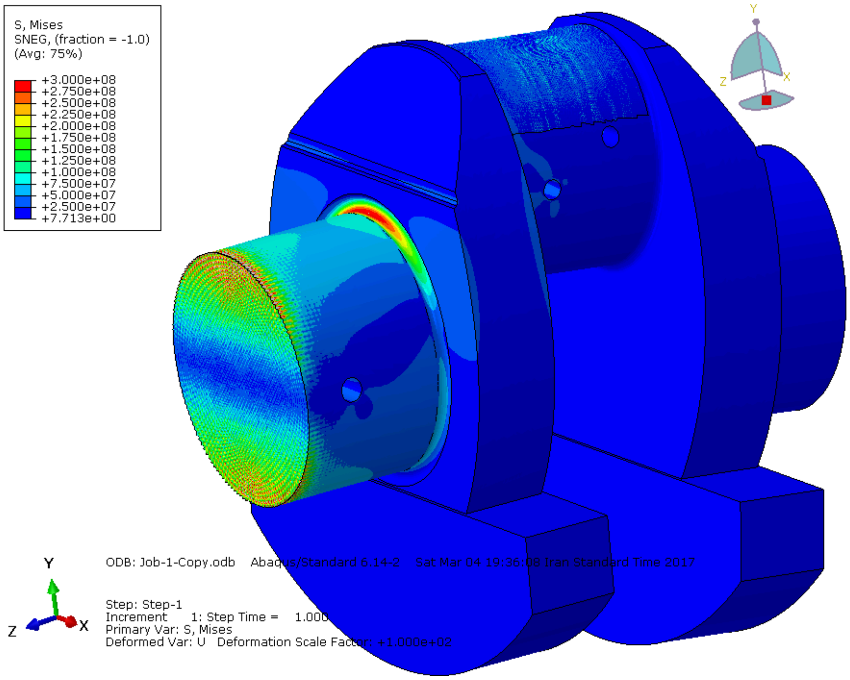
شکل 25 بارگذاری ناشی از احتراق بر روی یاتاقان متحرک

بیشینۀ تنش با استفاده از بیشینۀ فشار احتراقی 13 مگاپاسکل و ابعاد یاتاقان و با استفاده از رابطۀ زیر محاسبه شده است.

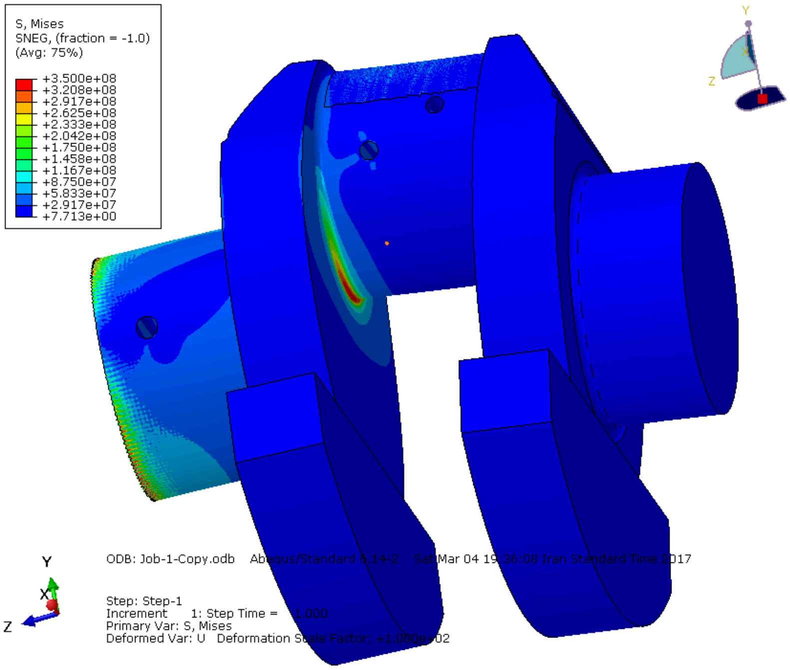
$Q_{max} = \frac{9}{16} \times \frac{F_c}{RL}$	(1)

در رابطۀ (1)، Fc نیروی احتراق، R شعاع ژورنال و L طول آن است.

با توجه به تحلیل انجام گرفته بیشترین تمرکز تنش در محل اتصال محور و ژورنال به وب (web) اتفاق می افتد. تنش حداکثر خستگی تحت این بارگذاری **345 *Mpa*** است که با فرض فوق ضریب اطمینان **1.21** است.



شکل 26 توزیع تنش در محل اتصال محور به وب



شکل 27توزیع تنش در محل اتصال ژورنال به وب

بررسی میل لنگ شکسته شده نشان می دهد که شکست از نوع خستگی است و در محل اتصال ژورنال به وب اتفاق افتاده است. بر اساس نتیجه شبیه سازی نیز(شکل 26 و شکل 27) بیشتر محدودهٔ تنشی در این نواحی است. علاوه بر اینکه ناحیه شروع (جوانه زنی) ترک مشاهده شده با ناحیه بیشترین تنش بدست آمده از تحلیل اجزای محدود مطابقت دارد.

1-5 مراجع

[1]. ESAB Group. "Repair and maintenance welding handbook." *ESAB AB, undated* 120.

[2]. Bennett, Sean. *Medium/Heavy Duty Truck Engines, Fuel & Computerized Management Systems*. Cengage Learning, 2012.

[3]. Koehler, H., et al. "Laser reconditioning of crankshafts: From lab to application." *Physics Procedia* 5 (2010): 387-397.

[4]. Repair and Maintenance Welding Handbook, (Esab Repair & Maintenance Consumables)

[5]. CHIVU, Oana-Roxana, et al. "PRELIMINARY RESEARCH ON THE OPTIMIZATION OF THE RECONDITIONING BY WELDING TECHNOLOGY OF CERTAIN ELEMENTS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY.", Series D, Vol. 77, Iss. 2, 2015

[6]. Chivu, O., et al. "The effects of reconditioning by welding of crankshafts in automotive industry." *Metalurgija* 55.1 (2016): 55-58.

فاز 2 –

روشهای بهبود سطح و تنشگیری

2-روشهای بهبود سطح و تنش گیری

مقدمه

میل لنگ های لکوموتیو عموماً در معرض سایش قرار دارند که سایش عمدتاً در بخشهایی از میل لنگ که در تماس با یاتاقان ها می باشد اتفاق می افتد، گاهی نیز آسیب وارده به میل لنگ به صورت لهیدگی مشاهده می شود که وجود این عیوب بر عملکرد مناسب میل لنگ تاثیر منفی خواهد داشت. عمده آسیب وارده به میل لنگ، خراشیدگی، ترک خوردگی وساییدگی می باشد که عدم شناسایی و برطرف کردن به موقع این ترکها می تواند آسیب های شدیدتری را به دنبال داشته و اثرات نامطلوبی بر رفتار ارتعاشی میل لنگ و حتی پیش روی طول ترک و گذار از طول بحرانی و زوال و تخریب های جدی را به دنبال داشته باشد. هر عیب در یک میل لنگ، علائم ارتعاشی خاص خود را دارد. مهمترین تفاوت در ارتعاشات ناشی از عیوب مختلف، در طیف فرکانسی آنها مشاهده می شود. به این ترتیب ارزیابی طیف فرکانسی و استفاده از آنالیز ارتعاشات یکی از بهترین روش ها برای عیب یابی محور های دوار و میل لنگ ها می باشد.

2-1 روشهای بهبود و اصلاح سطوح خش دار میل لنگ در ناحیۀ یاتاقانهای ثابت و متحرک

برای بهبود و اصلاح سطوح خش دار میل لنگ می توان از روشهای مختلفی استفاده نمود. از روش ماشینکاری معمولاً برای

تعمیر محل های ساییده شده (محل هایی حاوی خراشیدگی ها، تخلخل ها و ناهمواری های سطحی) که میزان آسیب دیدگی بسیار جزیی و کم عمق باشد، استفاده می شود. این روش برای تعمیر و اصلاح برخی آسیب دیدگی‌ها که بر اثر سایش اتفاق افتاده است، روش قابل قبولی است. همچنین به کمک این روش می توان افزایش سختی سطح روتورها به ویژه در محل‌هایی که امکان لایه برداری جزیی وجود دارد را کاهش داد. برای این منظور ابتدا محل مورد نظر را به طور کامل پولیش کرده و سپس به کمک ماشین تراشکاری، لایه سخت شده سطح روتور را در حالیکه روتور بر روی ماشین تراشکاری در حال چرخش می باشد، برداشته شود. با این روش نه تنها میزان پراکندگی سختی سطح روتور کاهش می یابد بلکه ترک ها و ناهمواری های سطح ناشی از سایش یا هر عامل دیگر نیز قابل رفع می باشد. از مزایای این روش می توان به سادگی عملیات، صرفه اقتصادی و عدم نیاز به فرآیندهایی نظیر عملیات حرارتی و مکانیکی که احتمال تغییرات ساختار داخلی را به همراه دارند اشاره کرد. همچنین ترک ها، خراشیدگی ها، تخلخل ها و ناهمواری های سطحی ناشی از سایش یا هر عامل دیگر، به طور قابل توجهی و یا به طور کامل از بین می رود. از معایب این روش این است که طیف کاربرد آن بسیار محدود و به عبارت دیگر فقط برای تخریب هایی سطحی تا عمق حداکثر 1/5 mm مجاز می باشد. همچنین در گوشه ها و نقاطی که دارای اشکال هندسی پیچیده هستند، عمل ماشینکاری با دستگاه تراش با مشکل مواجه می‌شود. ایجاد تغییر در ابعاد روتور را نیز می توان به معایب این روش افزود.

روش های مختلفی برای از بین بردن ترک درمحورها وجود دارد که می توان با توجه به محل ترک و عمق آن از طریق

اعمال تست های غیر مخرب، مناسب ترین روش تعمیر را انتخاب نمود و با تهیه دستورالعمل تعمیراتی به تعمیر و بازسازی میل لنگ پرداخت.

چنانچه ضخامت برداشته شده کم باشد می توان از روش متال اسپری برای ترمیم محور استفاده کرد؛ اما در ضخامت های بیشتر حتما از روش های جوشکاری قوسی زیر پوردی (SAW)، قوسی با الکترود تنگستن وگاز محافظ خنثی (GTAW) استفاده می شود. فرایند متال اسپری بر پایه پاشش فلز مذاب بر روی سطح به منظور دستیابی به یک لایه مقاوم طرح ریزی شده است. مواد پوشش دهنده به فرم مفتول توسط شعله که معمولاً شعله اکسی استیلن می باشد ذوب شده و سپس به وسیله هوای فشرده شده به شکل ذرات پاشش (اتمایز) می شود. هنگامی که ذرات به سطح فلز پایه برخورد می کنند قطرات ریز ذوب شده و به سرعت منجمد می شوند و پوشش را تشکیل می دهند. فرایند متال اسپری به عنوان یک فرایند سرد نامیده می شود زیرا درجه حرارت سطح فلز پایه در حین فرایند پایین نگه داشته شده و مانع از تغییرات متالورژیکی و اعوجاج در قطعه می شود. از این فرایند چه در گذشته و چه در حال حاضر به طور گسترده در قطعات و اجزاء ماشین و پوشش های مقاوم به خوردگی استفاده می شود.

یکی از مهمترین کاربرد های فرایند متال اسپری، ترمیم محل بالبرینگ، ایمپلر و سایر قطعات در پمپ ها و تجهیزات دوار می باشد. شکل (28) ترمیم محل بالبرینگ پمپ حلزونی سوخت در تاسیسات صنایع انرژی را نشان می دهد. مراحل عملیات متال اسپری شامل عملیات خشن تراشی به منظور پیوستگی و استحکام ذرات اتمایز شده بر روی قطعه می باشد.

قبل از عملیات پاشش، سطوح پیش گرم می شوند. عملیات پیش گرم برای از بین بردن رطوبت، چربی و آلودگی های سطحی و همچنین افزایش قابلیت پذیرش ذرات اتمایز شده توسط قطعه لازم است. قبل از عملیات پوشش دهی لازم است عملیات پوشش آستر توسط مفتول های باندینگ به منظور نزدیک شدن خواص متالورژیکی لایه های غیر همجنس و همچنین افزایش کیفیت لایه پوشش نهایی بر روی سطح انجام می گیرد. پس از ایجاد لایه آستر، پوشش نهایی متناسب با نوع لایه مورد نظر پاشش می شود. پس از اعمال لایه نهایی عملیات ماشین کاری و سنگ زنی به منظور دستیابی به اندازه و صافی سطح مورد نظر اجرا می شود.

شکل 28 ترمیم محل بالبرینگ به روش متال اسپری

سایر روش های جوشکاری برای تعمیر محل های تخریب شده با عمق زیاد که جهت مرمت آن ها نیاز به افزودن فلز با حجم زیاد می باشد مورد استفاده قرار می گیرد. تکنیک های

مختلفی شامل جوشکاری زیرپودری، جوشکاری قوسی با تنگستن و گاز محافظ و جوشکاری قوسی دستی قابل استفاده می باشد.

اگر عمق محل تخریب زیاد و میزان رسوب گذاری بالایی نیاز باشد و پهنای منطقه ترمیمی بر روی میل لنگ به اندازه کافی وسیع باشد به طوری که فضای لازم برای مانور بوم دستگاه زیرپوردی را فراهم آورد، روش قوسی زیر پوردی که دارای قدرت، نفوذ و نرخ رسوب بسیار بالایی است، بهترین گزینه است. در شکل (29) جوشکاری زیرپودری بر روی یک جوش طولی مخزن نمایش داده می شود، پودر جوش خاکریزی ایجاد می کند که قوس قابل مشاهده نیست. سیستم مکش ونازل مکش پودر اضافی در شکل دیده می شود. پودر اضافی مجدد بازیابی ودر سیستم تغذیه پودر استفاده می شود.

شکل 29 جوشکاری زیرپودری در امتداد طولی ونازل مکش پودر اضافی

در جوشکاری زیر پودری علاوه بر بهره بردن از نرخ رسوب بسیار بالا و نفوذ زیاد می توان به کیفیت بهتر جوش و نیمه اتوماتیک بودن و سیم رسانی مداوم وعدم تاثیر مهارت جوشکار

در کیفیت جوش اشاره نمود. در مواردی که پهنای جوش ترمیمی بر روی محور زیاد باشد می توان از سیستم تغذیه با چند سیم جوش استفاده نمود (شکل 30). چنانچه با حرارت داده شده زیاد (High Heat Flux) کار شود، ساختار میکروسکوپی ناحیه جوش درشت می شود که با روشهای عملیات حرارتی (نرمالایزینگ) می توان این عیب را مرتفع نمود.

شکل30جوشکاری زیرپودری با سیستم تغذیه چندالکترود

در صورتیکه عمق تخریب کمتر و میزان رسوب ناشی از جوشکاری محدودتر و منطقه ترمیمی بر روی میل لنگ کوچک و محدود باشد، روش قوسی با گاز محافظ خنثی مناسب تر است. دراین فرایند به علت عدم وجود سرباره و حذف واکنش های سرباره و مذاب، تغییر و تقلیل عناصر آلیاژی اتفاق نمی افتد و احتمال ایجاد معایبی از جمله تخلخل، ناخالصی و حبس سرباره بسیار کمتر و استحکام و مقاومت جوش دربرابر بارگذاری های دینامیکی و خستگی بهبود می یابد، تمرکز حرارتی (Heat Intensity) در این فرایند بالا بوده که منجر به کاهش پیچیدگی (Distortion) در جوش و همچنین کوچک شدن منطقه متاثر از حرارت جوش (HAZ) می گردد.

برای تعمیر محل تخریب شده با استفاده از این روش جوشکاری، ابتدا لایه آسیب دیده سطح روتور را باید لایه برداری کرد. سپس با استفاده از سیم جوش مناسب همجنس با محور (matching filler metal)، محل مورد نظر را با استفاده از پاس های مختلف در ضمن چرخش آهسته محور در معرض جوشکاری قرار می دهند. بدیهی است به واسطه حساسیت میل لنگ های لکوموتیو، روش تعمیراتی و جوشکاری بایستی با دقت بالا و اتخاذ تدابیری خاص از جمله انتخاب دمای حرارتی پیشگرم و پسگرم مطلوب، انتخاب مناسب دمای بین پاسی، انتخاب ماده پرکننده مناسب و متغیرهای جوشکاری مثل شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری و استفاده از پاس های مخالف و کوتاه، عمود کردن یا چرخش منظم روتور در حین عمل جوشکاری به منظور جلوگیری از ایجاد اعوجاج ناشی از اثرات ثقل روتور، انتخاب سیکل حرارتی مناسب به منظور کاهش یا حذف تنش های داخلی ایجاد شده، انجام گردد.

2-2 معرفی تنش های حاصل از انواع عملیات بهسازی میل لنگها

2-2-1 اهمیت تنش های پسماند

به تنشهای ایجاد شده در یک جسم بر اثر انجام هرگونه عملیات در حالیکه جسم تحت هیچ بارگذاري خارجي نیست به اصطلاح تنشهای پسماند گفته می شود. از آنجا که جسم باید در حالت تعادل باقي بماند در مقابل هر تنش کششي تنش فشاري نیز باید وجود داشته باشد که به این حالت خود تعادلي مي گویند. تعریف خود تعادلي به طور دقیقتر این است که مجموع

نيروها و ممانهاي ناشي از تنشهای پسماند در جسم برابر صفر مي باشد. عموماً عبارت تنش پسماند به صورت اثر استاتيكي، نماينده ميدانهاي تنشي تك محوري يا چند محوري در يك سيستم بسته بدون وجود هيچگونه نيرو يا گشتاور خارجي است كه اين مواضع تنشي با هم در تعادلند.

اهميت شناسايي تنشهاي پسماند هنگامی كه جسم تحت تنش خارجي قرار ميگيرد و به تنش پسماند افزوده ميشود بيشتر مشخص می شود. به عنوان مثال اگر در نقطهای از جسم تنش پسماند كششي وجود داشته باشد و بارگذاري نيز تنش كششي ايجاد كند، سطح تنش در آن نقطه بالاتر از تنش محاسبه شده در اثر بار خارجي خواهد بود. لذا در صورتي كه تنش كششي پسماند داخلي در نظر گرفته نشود و قطعه تنها براساس تنش اعمالي خارجي طراحي شود ممكن است در اثر تنشهاي پسماند خارجي تنش در قطعه از حد تسليم آن بالاتر رفته و باعث شكست آن گردد.

وجود تنش هاي پسماند در قطعات، در بعضي موارد سبب افزايش كارايي و در برخي ديگر كاهش كارايي را موجب مي شود. در بعضي موارد حساس كه قطعه بايد كارايي فوق العاده داشته باشد، شناسايي چنين تنش هايي بسيار ضروري به نظر مي رسد.

2-2-2 نحوه ايجاد تنش پسماند كششي در جوش

يكي از فرايندهايي كه باعث ايجاد تنش پسماند در سازهها ميگردد جوشكاري است كه به علت گرم و سرد شدنهاي متوالي جوش و مناطق نزديك جوش و عدم امكان جابجايي در

بعضي جهات، تنشهاي پسماند داخلي در جوش و مناطق مجاور آن بوجود مي آيد.

میزان انبساط و تغییر شکل جسم در مقابل گرما متناسب با درجه حرارت است که در فلزات تا نقطه ذوب آنها با افزایش درجه حرارت میزان انبساط آنها افزایش می یابد. هنگامي که در نقطه‌اي از جسم درجه حرارت به طور موضعي افزايش يابد در اطراف آن شيب حرارتي و تمايل به تغيير شكل و انبساط بوجود مي‌آيد. در حالی که ناحیه اطراف احاطه کننده نقطه مزبور (که در دمای پایین تری قرار دارد) میل به تغيير شكل ندارد و با تغيير شكل مقابله مي‌كند. در نتيجه مناطق نزديك اين نقطه تحت تنش فشاري قرار مي‌گيرند و در صورتي كه تنش فشاري موجود از حد تسليم بيشتر شود باعث تغيير شكل پلاستيك در اين ناحيه مي‌شود. در حين فرآيند سرد شدن، ناحيه گرم شده شاهد انقباض موضعي خواهد بود كه باعث ايجاد تنش كششي در حد تنش تسليم در مجاورت اين نقطه می شود.

در جوش ها وجود تنشهای پسماند بر عملکرد صحیح آنها تأثير بسزايي مي گذارد. جوشکاری تنشهاي پسماندي را در قطعات جوشكاري شده ايجاد مي كند كه اگر با عملياتي مناسب رهاسازي نشود مي تواند سبب اعوجاج قطعه، واماندگي زودرس در هنگام خستگي و يا ترك در طول قسمت جوشكاري شود.

تنش هاي پسماند ناشي از جوشكاري، در اثرگرم و سرد شدن سريع مواد در نزديكي منبع گرمايي، همانگونه كه قبلاً اشاره شد، ايجاد مي شوند. تنش هاي پسماند كششي عمر خستگي مؤثر قطعات جوشكاري شده را كاهش داده كه اين پديده عامل واماندگي زودرس قطعه مي شود.

تنش‌های پسماند در بعضي مواقع می توانند مفید واقع شوند. به عنوان مثال تنش‌هاي فشاري روي سطح از ايجاد خوردگي و همچنين رشد ترك جلوگيري مي كند. به عبارت ديگر تنشهاي پسماند فشاري در قطعات عمداً ايجاد شده تا به مقاومت در برابر خستگي و جلوگيري از رشد ترك كمك كند. عوامل مختلفی بر ميزان تنشهای پسماند ايجاد شده در عمليات جوشكاري از جمله ابعاد قطعه جوشكاري، خواص مكانيكي فلز پايه و فلز جوش، مهار كردن قطعه، تغييرات فازي، فرآيند جوشكاري و حجم فلز جوش موثر هستند.

با توجه به نكات گفته شده انجام عمليات تنش زدايی(به خصوص حذف تنش‌های پسماند كششی) پس از جوشكاری ضروری به نظر می رسد. در تنش زدايي عموماً يك يا هر دو هدف زير مورد نظر است:

۱. پايداري ابعادي قطعه: در مدت زمان طولاني معمولاً درصد كمي كاهش تنش پسماند براي رسيدن به پايداري مطلوب كافي است.

۲. تحمل بارهاي متناوب: براي آنكه قطعات بتوانند بارهاي متناوب را به خوبي تحمل كنند سطح تنشهاي پسماند مي بايست تقريباً صفر شود.

روشهاي موجود براي رهاسازي تنش هاي پسماند ناشي از جوشكاري شامل روشهاي مكانيكي، حرارتي و الكترومغناطيسي هستند. روش مكانيكي بوسيله اعمال ضربه با چكش و يا ارتعاش است. روش حرارتي شامل گرم نمودن تمام قطعه جوشكاري شده و يا فقط بخش جوش است و در روش الكترومغناطيس از تكنيك چكش الكترومغناطيس استفاده مي شود. عوامل بسيار موثر در بحث

تنش زدایی سبب مي شود كه پيشبيني دقيق فرآيند رهاسازي تنش مشكل گردد. از اين رو بسياري از شركتها از نتايج پيشين خود يا داده هاي تجربي بهره می گیرند.

براي كاهش تغيير شكل و تنش هاي پسماند در عمليات جوشکاری روشهاي مختلفي وجود دارد. برخی از اين روشها مربوط به طراحي جوش است که می توان تا حد امکان با اجراي طراحي صحيح مانع تغيير فرم جوش شد. اين روشها عبارتند از:

1. اتصال متقارن جوشي
2. ترتيب مناسب براي جوشكاري
3. انتخاب مناسب پارامترهاي جوشكاري

تغيير شكلها در صورتي كه سطح مقطع قطعه غير متقارن باشد خيلي بيشتر خواهد بود. به اين دليل سعي مي شود با متقارن كردن جوشكاري به صورت اضافه كردن پاس جوشهاي ديگر در جهت متقارن نسبت به جوش هاي قبلي از تغيير شكل قطعه در اثر عدم تقارن جلوگيري شود. ترتيب انجام مراحل مختلف جوشكاري نيز بر روي تغيير شكل انتهايي كار مهم است. ترتيب انجام جوش به نوع قطعه و ابعاد آن بستگي دارد. در انتخاب پارامترهاي جوشكاري نيز پارامترهاي جريان، ولتاژ و سرعت جوشكاري ازمحدوديت هاي تكنولوژي به شمار مي روند و با انتخاب مناسب اين پارامترها و در نتيجه آن انرژي ورودي مناسب به جوش تغيير شكل نهايي كاهش مي يابد.

2-3 روشهای تنش گیری بعد از عملیات بهسازی میل‌لنگ‌مورد بررسی

2-3-1 عملیات حرارتی پیش گرم و پس گرم

چون میل لنگ از جنس کرم مولی کم آلیاژی 42CrMo4 است و میزان درصد منگنز نیز بالا می باشد سختی نسبتا" بالا و سختی پذیری (Hardenability) نیز زیاد می باشد. لذا برای کنترل سرعت سرد شدن (Cooling rate) و رسیدن به یک ساختارمطلوب با تافنس مناسب و قابل انعطاف که بتواند در برابر ارتعاشات محور طی دور گیری ورسیدن به دور نامی مقاومت مناسبی ارائه دهد، ضروری است از عملیات پیش گرمایش استفاده شود. دمای پیش گرمایش را می توان از مقدار کربن معادل (Carbon equivalent) با توجه به درصد عناصر آلیاژی تعیین نمود.

Carbon Equivalent (CE) = %C+1/6(%Mn+%Si)+1/5(%Cr+%Mo+%V)

+1/15(%Ni+%Cu)

رابطه کربن معادل فوق توسط موسسه بین المللی جوشکاری (IIW) ارائه شده است.

به دلیل اینکه مقدارکربن معادل آلیاژ میل لنگ بالا است (CE of Crankshaft >1) جوش پذیری ضعیف ارزیابی می شود و حتما" لازم است تمهیدات ضروری از جمله عملیات پیش گرمایش و پس گرمایش، دمای بین پاسی، الکترودمناسب، کنترل حوضچه مذاب به منظور انجام مطلوب عملیات جوشکاری و پیش گیری از معایب در ناحیه جوش و منطقه مجاورجوش بعمل آید.

برمبنای مقدارکربن معادل، میزان دمای پیش گرم پانصد درجه فارنهایت تعیین می گردد.

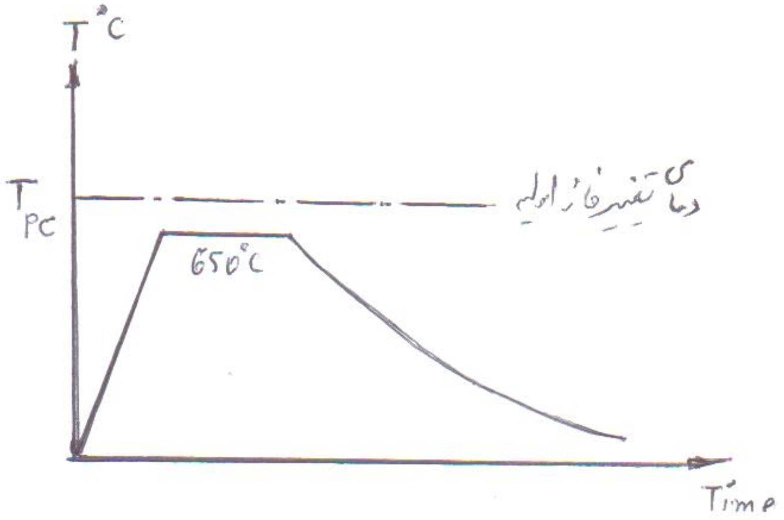
$T_{Preh} = 500°F = 260°C$

2-3-2 عملیات پس گرمایش جوش[7]

برمبنای تصاویر میکروسکپی نمونه جوش بررسی شده در این تحقیق، که نشان دهنده وجود مارتنزیت می باشد و براساس آزمون سختی که نشان دهندۀ زیاد بودن سختی است، عملیات پس گرمایش جوش به صورت تنش زدایی (Stress relief) با توجه به شرایط کاری میل لنگ و لزوم تغییرات دور به منظور رسیدن به دور ثابت و ضرورت عبور وگذر از مدهای فرکانسی خاص تحت رزونانس و ارتعاشات اجباری، توصیه می گردد. پیشنهاد می‌شود افزایش دمای ناحیه جوش در مرحله گرم کردن توسط المان‌های حرارتی، عبور جریان الکتریکی و یا به روش القایی انجام گردد و از گرمایش موضعی میل لنگ توسط شعله گاز خودداری شود.

از این رو پیشنهاد می شود عملیات تنش زدایی مطابق با پروفیل دمایی بشرح ذیل و مطابق با گراف تنش زدایی شکل (31) انجام پذیرد.

[7] Post Weld Heat Treatment



شکل31 عملیات تنش زدایی

الف) گرم کردن موضعی منطقه جوش با استفاده از روش القایی تا دمای زیر درجه حرارت تغییر فاز اولیه، تا 650 درجه سانتی گراد.

ب) نگهداری در دمای فوق.

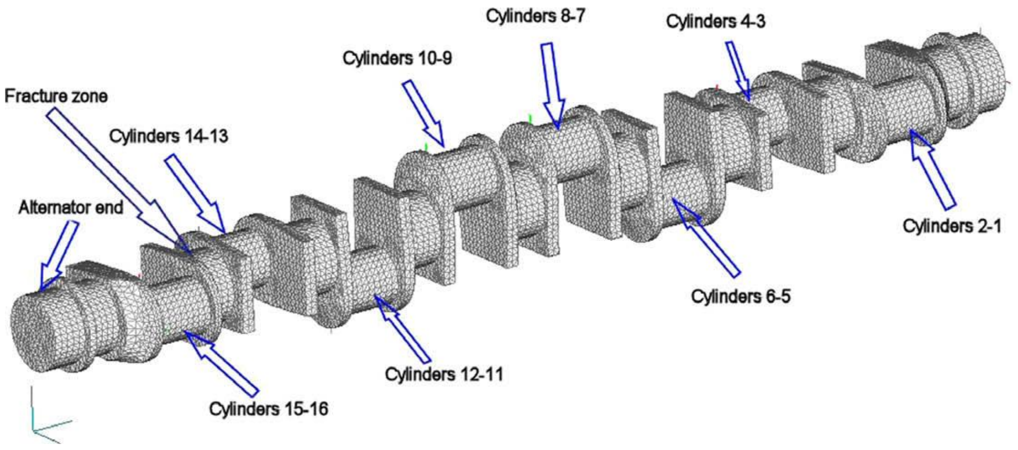
ج) خنک کاری آرام.

فاز 3 - مشخصات فیزیکی-متالورژیکی و تحلیل نمونه ها

3-مشخصات فیزیکی-متالورژیکی و تحلیل نمونه ها

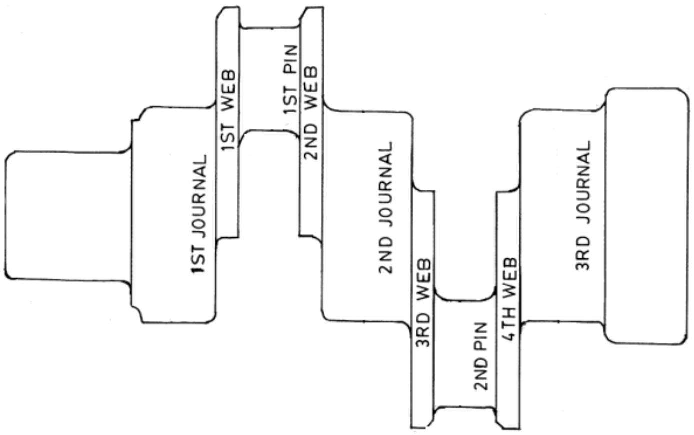
مقدمه

میل لنگها قطعه‌ای داخلی در موتورهای دیزلی هستند که با قطعاتی از جمله شفت اصلی[8]، پیستون، سیلندر و یاتاقان[9] در ارتباط هستند. معمول ترین عامل خرابی و شکست در میل لنگ ها، خستگی تشخیص داده شده است[1]. در شکل‌های (32) و (33) به ترتیب مدل المان محدود[10] و مدل شماتیکی از یک میل لنگ نمایش داده شده است.



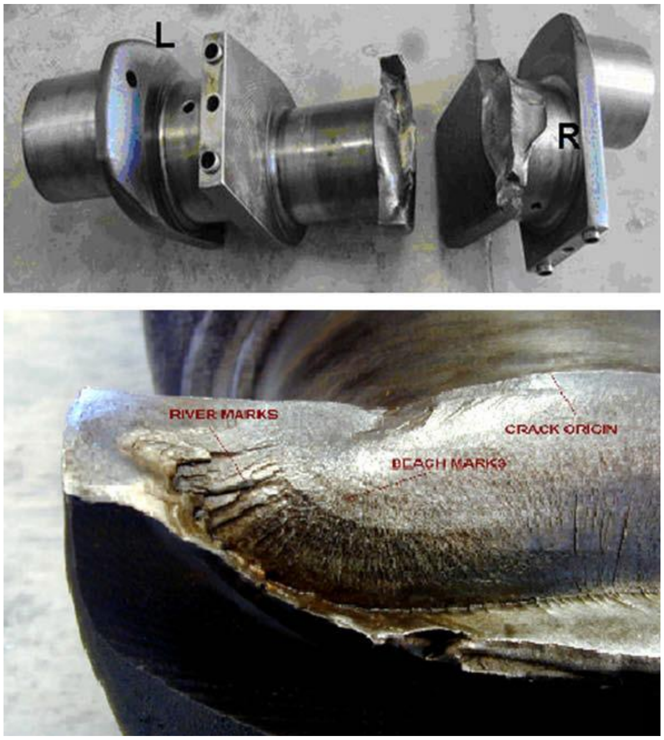
شکل 32: مدل المان محدود از یک میل لنگ [1]

1) Rod
2) Bearing
3) Finite element

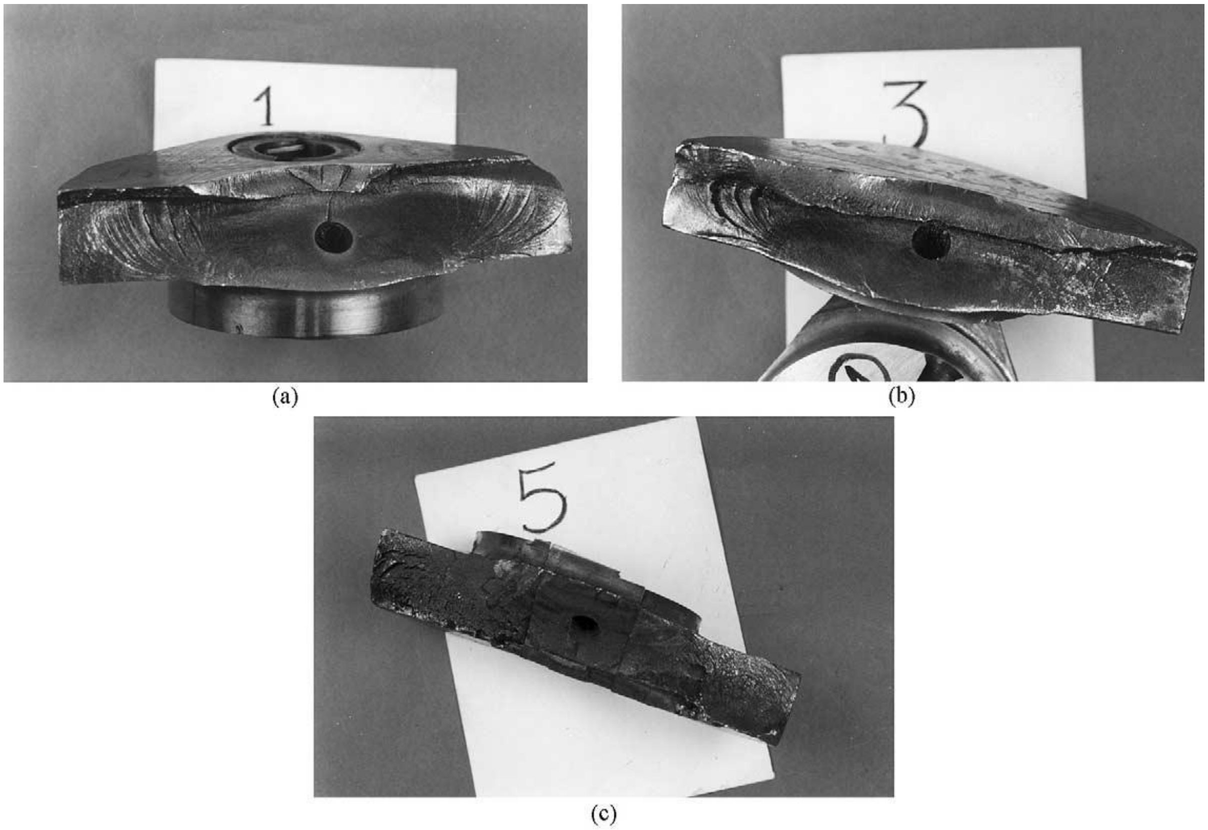


شکل33: مدل شماتیکی یک میل لنگ و اجزای تشکیل دهنده آن [2]

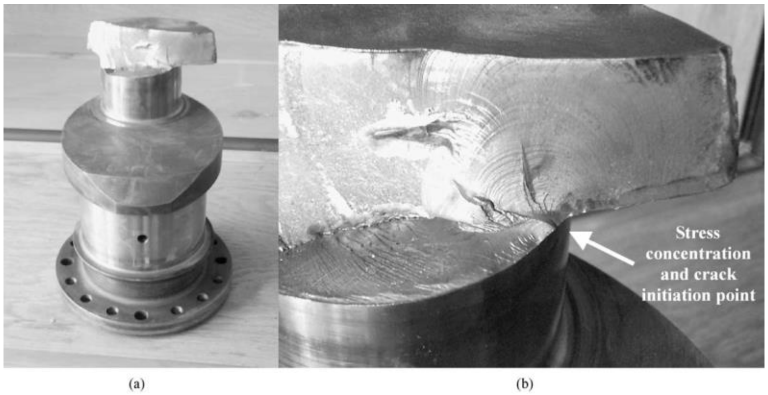
برای آشنایی بیشتر با محل شکست در میل لنگ ها و نیز سطح شکست آنها تعدادی از تصاویر ماکروسکوپی سطح شکست در میل لنگ های مختلف سبک و سنگین در شکلهای (34) تا (37) ارایه شده است..



شکل34: سطح شکست در یک میل لنگ [1]

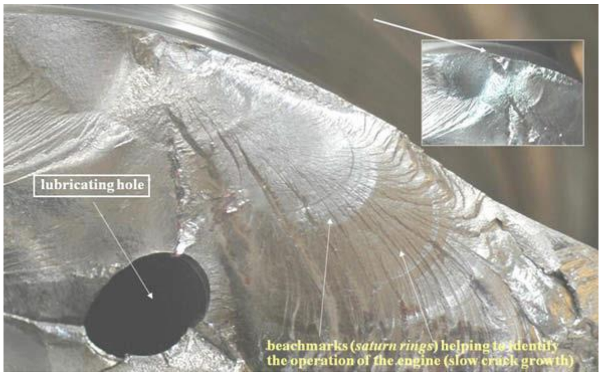


شکل35: سطح ماکروسکوپی شکست [2]



شکل (5): شکست میل لنگ قطار، (a)بخشی از میل لنگ شکسته شده. (b)سطح شکست ناشی از خستگی به همراه نقطه شروع ترک که به دلیل تمرکز تنش رخ داده است [3]

شکل36: سطح شکست، (a)شکست نهایی موازی با محور میل لنگ رخ داده است.
(b)مسیر رشد ترک خستگی عمود بر محور میل لنگ است [4]



شکل37: منطقه شروع ترک و نشانه‌های ساحلی نشان دهنده مسیر رشد ترک خستگی [4]

معمولاً میل لنگ‌ها بعد از تعمیر(سنگ زنی و سرهم کردن مجدد) در ساعت کاری کمتری از قبل دچار شکست می‌شوند. مشکلاتی که بعد از تعمیر پیش می‌آید به دلیل سنگ زنی نامناسب و عدم هم محور بودن میل لنگ است، همچنین عدم کشیدگی مناسب میل لنگ و یا نامناسب بودن عملیات پرداخت سطح و نهایتاً چنانچه جوشکاری لازم باشد، نامناسب بودن شرایط و فرایند جوشکاری می‌تواند عوامل شکست قطعه بعد از انجام تعمیر باشد[3].

تخریب میل لنگ‌ها به دلیل آسیب‌هایی که در یک یا چند شفت رابط[11] اتفاق می‌افتد می‌تواند مربوط به عملکرد موتور[12] ، نیروهای مکانیکی[13] و عملیات تعمیر[14] باشد که جزئیات آن در ادامه ذکر شده است[3].

اختلال در عملکرد موتور شامل موارد زیر می‌باشد:

1. فقدان روغن[15]
2. روانکاری ناقص بین ژورنال‌ها[16]
3. دمای کاری بالای روغن[17]
4. استفاده نادرست از موتور[18]

1) Journal
2) Operation source
3) Mechanical source
4) Repairing source
5) Oil absence
6) Defective lubrication on journal
7) High operating oil temperature
8) Improper use of the engine

ایجاد نیروهای مکانیکی نامطلوب در اثر موارد زیر است:

1. ناهمترازی میل لنگ به هنگام سرهم کردن[19]
2. اندازه نامناسب ژورنال و یاتاقان[20]
3. عدم کنترل لقی بین ژورنال و یاتاقان[21]
4. لرزش‌های میل لنگ[22]

و در نهایت مواردی که در عملیات تعمیر ایجاد می شوند شامل موارد زیر می‌باشد:

1. ناهمترازی ژورنال[23]
2. ناهمترازی میل لنگ[24]
3. تمرکز تنش بالا[25]
4. زبری سطح بالا[26]
5. جوشکاری یا نیتروژن‌دهی نامناسب[27]
6. عملیات مستقیم کنی[28]
7. سنگ زنی ناقص[29]

---

9) Misalignments of the crankshaft on assembly
1) Improper journal bearings (wrong size)
2) No control on the clearance between journals and bearings
3) Crankshaft vibrations
4) Misalignments of the journals (due to improper grinding)
5) Misalignments of the crankshaft (due to improper alignment of the crankshaft)
6) High stress concentrations (due to improper grinding at the radius on both sides of the journals)
7) High surface roughness (due to improper grinding, originating wearing)
8) Improper welding or nitrating
9) Straightening operations
10) Defective grinding

به طور کلی برای آنالیز تخریب میل لنگها بایستی مراحل زیر انجام پذیرد [2]:

- تعیین ترکیب شیمیایی و ریزساختار متریال میل لنگ
- ارزیابی خواص مکانیکی متریال مورد استفاده
- بررسی چشمی از ناحیه شکست
- تخمین نقطه شروع و انتشار ترک خستگی
- مطالعه مکانیزم خستگی به وسیله میکروسکوپ الکترونی (SEM) [30]

3-1 مشخصات فیزیکی و متالورژیکی میل لنگ ها در نواحی مختلف شامل دانه بندی و سختی نواحی مختلف

در این پروژه از میل لنگ مورد مطالعه به منظور تعیین استاندارد ماده و تشخیص تغییرات ریزساختاری و متالورژیکی نمونه برداری شد. تعداد 2 نمونه که یکی از بخش سالم و بدون شکست تحت عنوان نمونه شماره 1 و دیگری از بخش شکسته شده میل لنگ با نام نمونه شماره 2 نمونه برداری انجام پذیرفت. کلیه آزمونهای شیمیایی، متالوگرافی و مکانیکی اعم از کشش، ضربه و سختی سنجی بر روی هر 2 نمونه انجام شد و نتایج به شرح ذیل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

---

11) Scanning Electron Microscope

ترکیب شیمیایی هر 2 نمونه در جدول‌های 3 و 4 بر اساس استاندارد مرجع ASTM E415-15 ارائه شده است. با مطابقت نتایج آزمون کوانتومتری با استاندارد BS EN10250-3 (2000) مشخص گردید متریال فلز پایه در هر 2 نمونه 42CrMo4+QT[31] بوده و این متریال معادل SA-29 Grade 4140 در استاندارد ASME Sec II Part A می باشد.

جدول 3 : ترکیب شیمیایی نمونه شماره 1 به همراه حدود پذیرش استاندارد

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
0.42	0.22	0.63	0.019	0.003	1.11	0.20	0.13	0.012	0.01	0.14	0.004
Ti	V	W	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Bi	As	Fe	
0.007	0.008	< 0.015	< 0.01	0.006	< 0.0008	Trace	0.01	0.006	0.01	Base	

BS EN 10250-3 (2000) Designation 42CrMo4 حدود مجاز ترکیب شیمیایی استاندارد

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Min	0.38	*	0.60	*	*	0.90	0.15
Max	0.45	0.40	0.90	0.035	0.035	1.20	0.30

جدول 4 : ترکیب شیمیایی نمونه شماره 2 به همراه حدود پذیرش استاندارد

1) Quench Tempered

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
0.42	0.22	0.62	0.015	0.003	1.10	0.20	0.13	0.009	0.01	0.14	0.003
Ti	V	W	Pb	Sn	B	Zr	Bi	As	Fe		
0.006	0.008	< 0.015	< 0.01	0.01	< 0.0008	0.02	0.01	0.004	Base		

BS EN 10250-3 (2000) Designation 42CrMo4 حدود مجاز ترکیب شیمیایی استاندارد

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Min	0.38	*	0.60	*	*	0.90	0.15
Max	0.45	0.40	0.90	0.035	0.035	1.20	0.30

نتایج آزمون ضربه و کشش در دمای محیط به ترتیب بر اساس استانداردهای جامع ASTM E23 (2016) و ASTM A370 (2016) برای هر 2 نمونه در جداول 5 الی 8 ارائه شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از آزمون های کشش و ضربه مشاهده گردید خواص مکانیکی هر 2 نمونه شماره 1 و 2 یکسان می باشد. لازم به ذکر است به دلیل محدودیت اندازه نمونه‌های شماره 1 و 2، برای آزمون ضربه و کشش از نمونه شماره 1 به صورت عرضی و از نمونه شماره 2 به صورت طولی نمونه برداری شده است.

جدول 5 : آزمون ضربه در دمای محیط برای نمونه شماره 1

ردیف	ابعاد نمونه (mm)	انرژی ضربه J	میانگین J	دمای آزمون ℃	نتیجه
1	10*10*55	27	28	محیط	جدا شد
2	10*10*55	27		محیط	جدا شد
3	10*10*55	30		محیط	جدا شد
حد مجاز استاندارد 42CrMo4 +QT			Min. 14	محیط	---

جدول 6 : آزمون کشش در دمای محیط برای نمونه شماره 1

ردیف	قطر نمونه (mm)	سطح مقطع S_0 (mm^2)	طول گیج (mm)	استحکام Proof 0.2%Offset R_t (MPa)	استحکام نهایی R_m (MPa)	ازدیاد طول نسبی % A	کاهش سطح مقطع %Z	توضیحات
1	4.07	13.01	16	675	903	18	59	---
2	4.13	13.40	16	731	951	18	60	---
عدم قطعیت $\%+/-U_E$								
حدود مجاز استاندارد Designation 42CrMo +QT			$5.65\sqrt{S_0}$	Min. 460	Min. 700	Min. 11	---	---

جدول 7 : آزمون ضربه در دمای محیط برای نمونه شماره 2

ردیف	ابعاد نمونه (mm)	انرژی ضربه J	میانگین J	دمای آزمون ℃	نتیجه
1	10*10*55	29	28	محیط	جدا شد
2	10*10*55	26		محیط	جدا شد
3	10*10*55	28		محیط	جدا شد
حد مجاز استاندارد 42CrMo4 +QT			Min. 27	محیط	---

جدول 8 : آزمون کشش در دمای محیط برای نمونه شماره 2

ردیف	قطر نمونه (mm)	سطح مقطع S_0 (mm^2)	طول گیج (mm)	استحکام Proof 0.2%Offset R_t (MPa)	استحکام نهایی R_m (MPa)	ازدیاد طول نسبی % A	کاهش سطح مقطع %Z	توضیحات
1	6.12	29.42	25	740	933	16	58	---
2	6.32	31.37	25	708	898	18	58	---
عدم قطعیت $\%+/-U_E$								
حدود مجاز استاندارد Designation 42CrMo +QT			$5.65\sqrt{S_0}$	Min. 460	Min. 700	Min. 15	---	---

با توجه به اظهارات مدیریت کارگاه تعمیرات میل لنگ، تعمیر میل لنگ با فرایند جوشکاری زیر پودری انجام شده است. در عملیات جوشکاری انجام شده ابتدا یک پاس اولیه با فیلر ساده کربنی با دمای پیش گرم حدود 200-250 درجه سانتیگراد اعمال شده، سپس با یک فیلر آلیاژی فرایند تعمیر به اتمام رسیده است. عملیات حرارتی پس از جوشکاری[32] به صورت موضعی[33]، اینگونه انجام شده است که دمای مقطع جوشکاری شده به حدود 400-450 درجه سانتیگراد رسیده، پس از رسیدن به

1) Post Weld Heat Treatment
2) Local

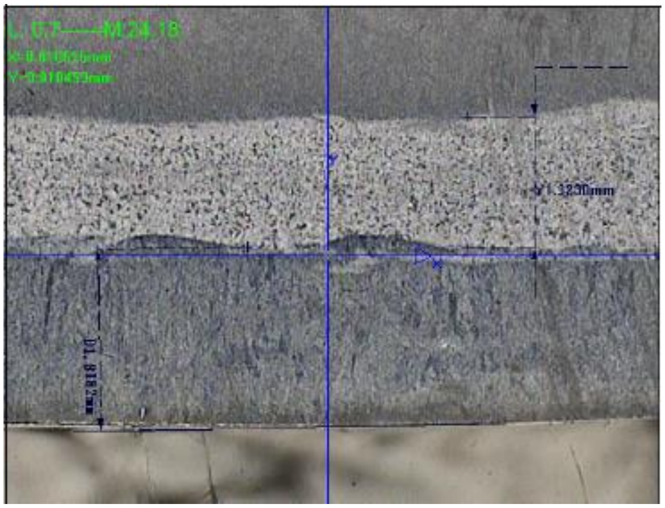
این دما حرارت دهی قطع شده و با عایق کاری سطح، مقطع جوشکاری تا دمای محیط به آرامی سرد شده است.

شکل 38 محل برش نمونه شماره 2 را نشان می دهد که از قسمت شکسته شده میل لنگ تهیه گردیده است.

شکل 38 : محل برش نمونه شماره 2 از منطقه شکسته شده میل لنگ

با بررسی های ماکروگرافی از سطح تا مغز برای نمونه شماره 2 که از محل شکست میل لنگ تهیه شده است، تغییرات ریزساختاری ناشی از این عملیات تعمیر کاملاً مشخص است (شکلهای 39 و 40).

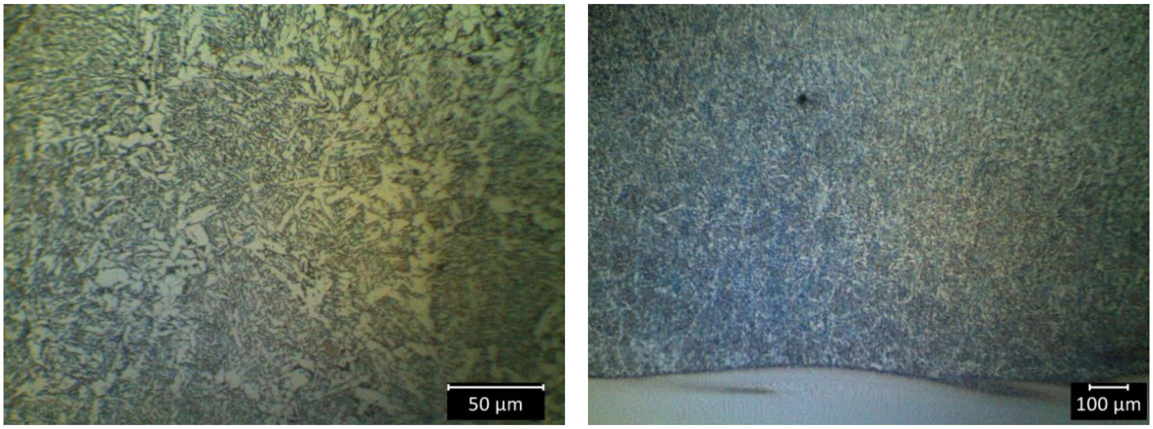
شکل 39 : نمونه ماکروگرافی از سطح تا مغز برای نمونه شماره 2



شکل 40 : مشاهده دو لایه جوش به ضخامت های 1/3 و 1/8 میلیمتر بر روی سطح نمونه شماره 2. محلول اچ: Vilella

بررسی تصاویر متالوگرافی به دست آمده از پاس اول جوش (شکل 41)، ریزساختار فریتی-پرلیتی لایه اول (لایه دارای 1/3 میلیمتر ضخامت) نشان می دهد فیلر مورد استفاده جهت پاس اول جوشکاری ساده کربنی است. آنالیز شیمیایی پاس اول جوش که از نمونه شماره 2 استخراج گردیده بر اساس استاندارد مرجع ASTM E415-15 در جدول 9 ارائه شده است. برای انجام

کوانتومتری و تعیین ترکیب شیمیایی پاس اول جوش، سطح نمونه شماره 2 حدوداً 2 میلیمتر سنگ زنی و آنالیز شیمیایی از مقطع سنگ زنی شده استخراج گردید.



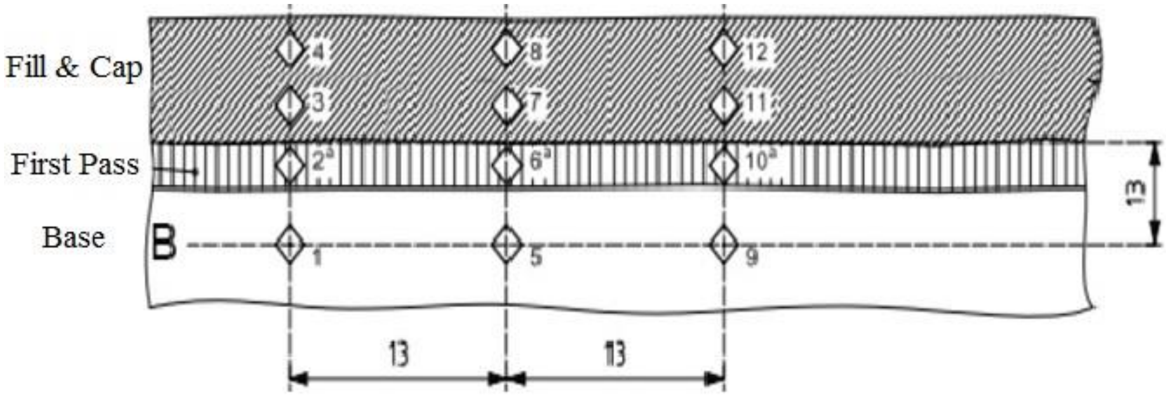
شکل 41 : ساختار فریتی پرلیتی به همراه فریت های سوزنی در پاس اول جوش (بزرگنمایی X100 و X500). محلول اچ: نایتال 2%

جدول 9 : ترکیب شیمیایی پاس اول جوش (ضخامت پاس اول حدوداً 1/3 میلیمتر)

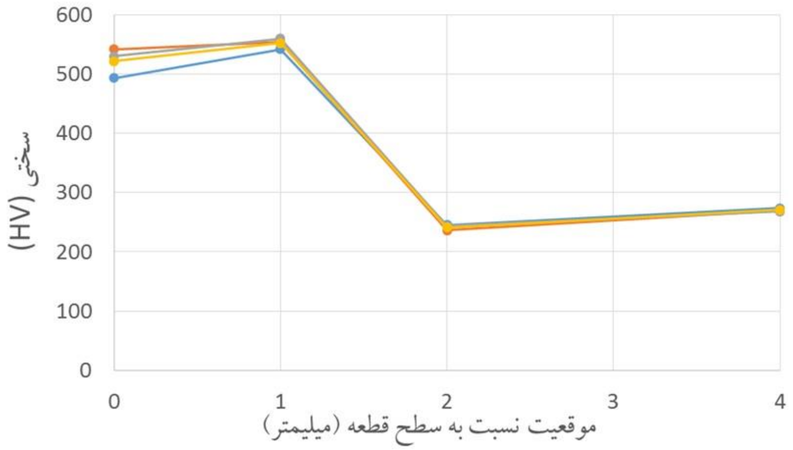
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
0.096	0.74	1.59	0.039	0.021	0.11	0.02	0.02	0.019	0.005	0.08	0.008
Ti	V	W	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Bi	As	Fe	
0.006	< 0.002	< 0.015	< 0.01	0.005	< 0.0008	Trace	0.01	< 0.01	0.009	Base	

پروفیل سختی بر روی نمونه شماره 2 مطابق تصویر شماتیک نشان داده شده در شکل 42 بدست آمده است. مقادیر سختی برای هر نقطه در جدول 10 ارائه شده است. شکل 43 نمودار توزیع سختی از سطح تا مغز نمونه را نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از پروفیل سختی اعداد مربوط به نقاط 2، 6 و 10 که در پاس اول جوش واقع شده اند کمترین مقدار سختی را نشان می دهد. پایین بودن مقادیر سختی در این لایه با

ریزساختار فریتی-پرلیتی مشاهده شده در این لایه هم خوانی دارد.



شکل42: تصویر شماتیکی موقعیت نقاط سختی سنجی شده در پروفیل سختی نمونه شماره 2

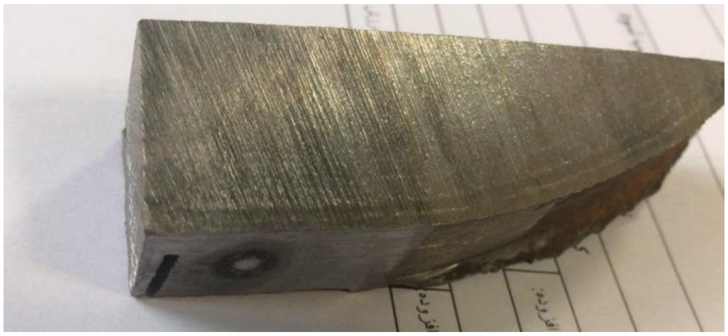


شکل43: نمودار توزیع سختی از سطح تا مغز نمونه شماره 2

جدول 10 : پروفیل سختی از سطح تا مغز نمونه شماره 2

عدد سختی (HV)	موقعیت سختی سنجی	ردیف
274	نقطه 1	1
245	نقطه 2	2
542	نقطه 3	3
493	نقطه 4	4
270	نقطه 5	5
236	نقطه 6	6
554	نقطه 7	7
542	نقطه 8	8
268	نقطه 9	9
243	نقطه 10	10
560	نقطه 11	11
530	نقطه 12	12

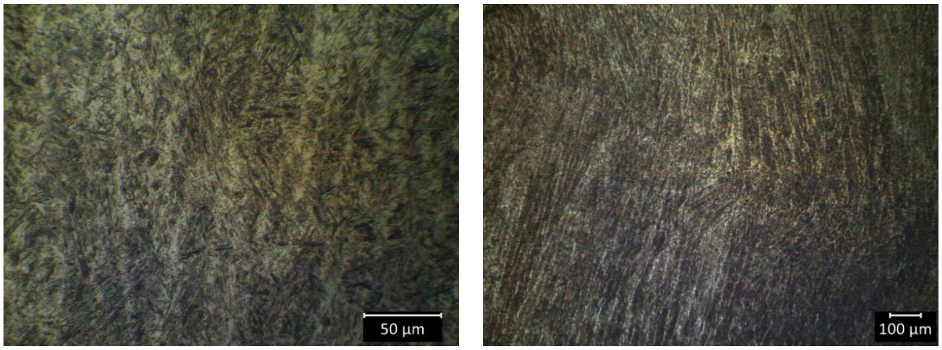
برای تعیین ترکیب شیمیایی پاس دوم جوش (لایه با ضخامت حدود 1/8 میلیمتر) سطح نمونه شماره 2 با یک سنگزنی نرم همانطورکه در شکل 44 مشاهده می شود آماده کوانتومتری گردید. ترکیب شیمیایی سطح نمونه شماره 2 که در جدول 11 قابل مشاهده است، آلیاژی بودن فیلر مورد استفاده در پاس دوم جوش را نشان می‌دهد که با ریزساختار به دست آمده از این لایه نیز مطابقت دارد. شکل 45 تصاویر متالوگرافی پاس دوم جوش را نشان می دهد.



شکل 44 : محل انجام کوانتومتری از سطح نمونه شماره 2

جدول 11 : ترکیب شیمیایی پاس دوم جوش (ضخامت پاس دوم حدوداً 1/8 میلیمتر)

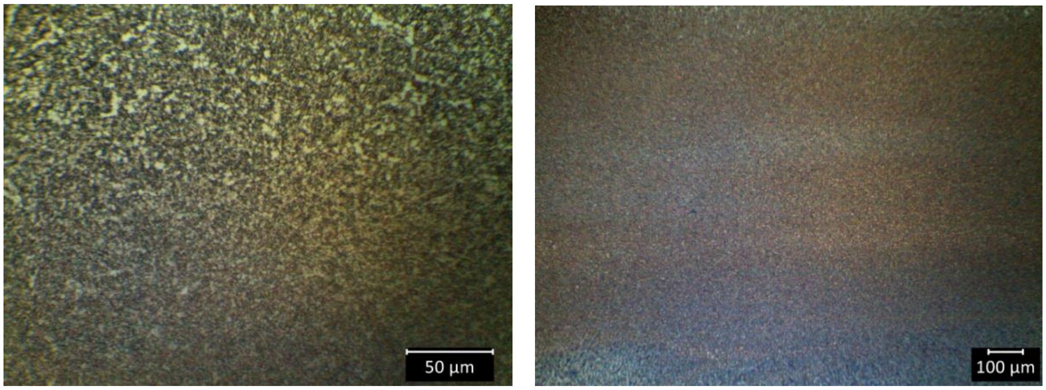
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
0.14	0.69	1.40	0.029	0.013	0.27	0.05	0.05	0.016	0.006	0.12	0.005
Ti	V	W	Pb	Sn	B	Zr	Bi	As	Fe		
0.003	< 0.002	< 0.015	< 0.01	0.01	< 0.0008	0.007	< 0.01	0.004	Base		



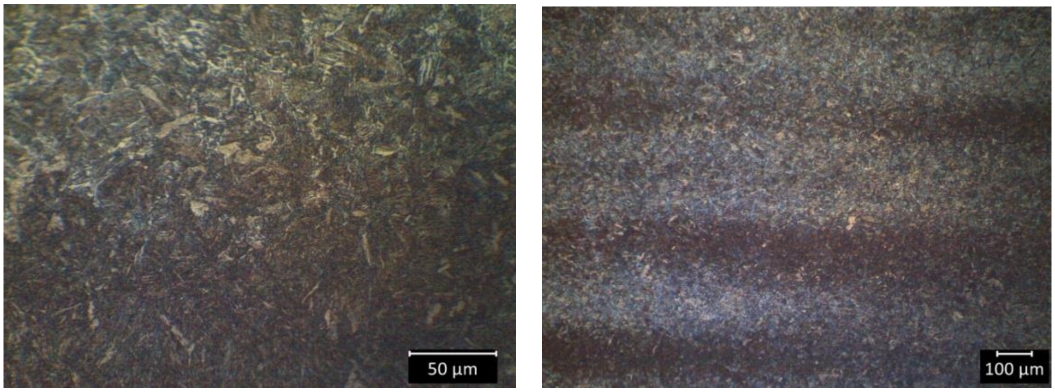
شکل45: ساختار مارتنزیت تمپر شده در پاس دوم جوش (بزرگنمایی X100 و X500). محلول اچ: Vilella

با توجه به پروفیل سختی، بیشترین اعداد سختی مربوط به پاس دوم جوش می باشد. اعداد سختی در نزدیکی سطح نمونه نسبت به اعداد سختی در عمق پاس دوم جوش مقادیر کمتری را نشان می دهد، این کاهش سختی در سطح می تواند با انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری که در کارگاه تعمیرات میل لنگ انجام شده است قابل توجیه باشد، چرا که محدوده دمایی مورد استفاده در کارگاه تعمیرات نقش موثری در تنش زدایی سطح جوشکاری شده دارد. تصاویر متالوگرافی منطقه متأثر از حرارت[34] و فلز پایه به ترتیب در شکل های 46 و 47 نشان داده شده است. با مقایسه شکلهای 46 و 47 مشاهده می شود که ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت در مقایسه با ریزساختار فلز پایه از پایداری و یکنواختی بیشتری برخوردار است.

1) Heat Affected Zone



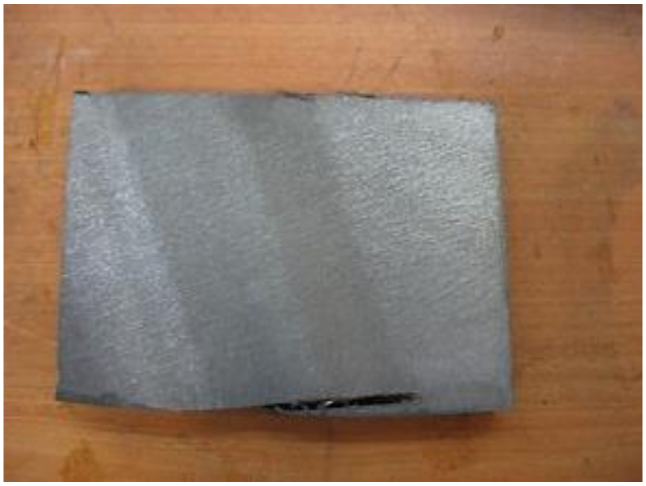
شکل 46 : ساختار مارتنزیت تمپر شده-بینیتی در ناحیه متأثر از حرارت (بزرگنمایی X100 و X500). محلول اچ: نایتال 2%



شکل 47 : ساختار مارتنزیت تمپر شده-بینیتی در فلز پایه (بزرگنمایی X100 و X500). محلول اچ: نایتال 2%

به منظور مشاهده تغییرات احتمالی ریزساختاری در نمونه شماره 1 ، نمونه ماکروگرافی از سطح تا مغز برای این نمونه نیز تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. تصویر ماکروگرافی نمونه شماره 1 در شکل 48 نشان داده شده است که هیچگونه تغییر ریزساختاری از سطح تا مغز نمونه مشاهده نمی‌گردد و ساختار متریال کاملاً یکنواخت و تک لایه می‌باشد. برای نمونه شماره 1 نیز پروفیل سختی از سطح تا مغز نمونه تهیه گردید که در جدول 12 ارایه شده است. یکنواختی اعداد سختی در پروفیل

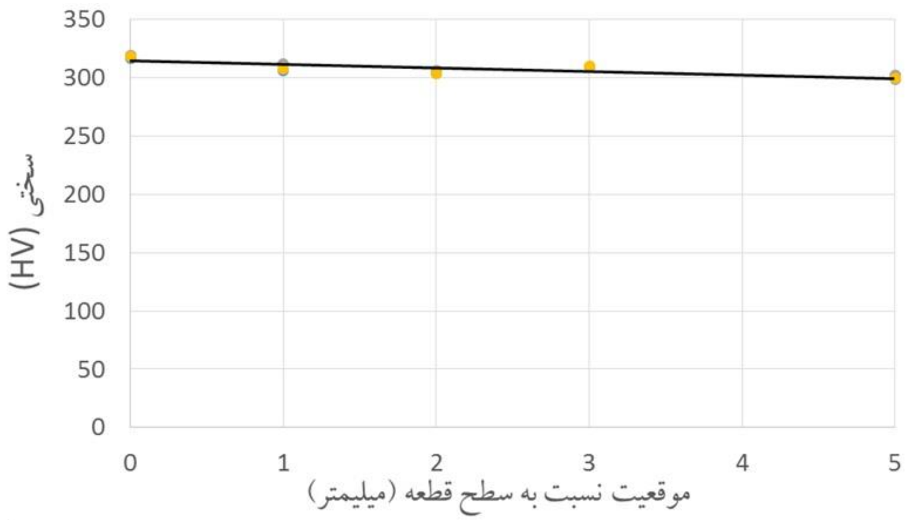
سختی نمونه شماره 1، یکنواختی ریزساختار ماکروسکوپی نشان داده شده در شکل 48 را تصدیق می کند. شکل 49 نمودار تغییرات سختی از سطح تا مغز برای نمونه شماره 1 را نشان می‌دهد.



شکل 48 : تصویر ماکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده نمونه شماره 1. محلول اچ: نایتال 10%

جدول 12 : پروفیل سختی از سطح تا مغز نمونه شماره 1

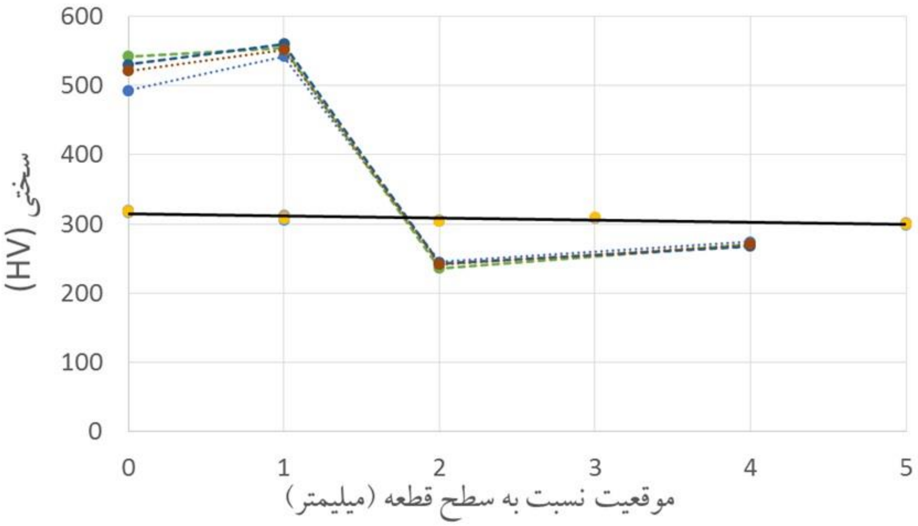
ردیف	موقعیت سختی سنجی	عدد سختی (HV)			
		نقطه 1	نقطه 2	نقطه 3	میانگین
1	نزدیکترین نقطه به سطح	319	317	319	319
2	1mm	306	309	312	309
3	2mm	302	304	306	304
4	3mm	312	309	309	309
5	مغز	297	299	302	299



شکل 49 : نمودار توزیع سختی از سطح تا مغز نمونه شماره 1

3-2 تحلیل نمونه های شکسته شده

با مقایسه تغییرات ریزساختاری و سختی، مطابق شکل 50، نمونه های شماره 1 و 2 می توان دریافت که تعمیرات انجام شده با فرایند جوشکاری در کارگاه تعمیرات میل لنگ، میزان سختی را در سطح نمونه شماره 2 به میزان قابل ملاحظه ای افزایش داده است که این تغییرات سختی، باعث افزایش حساسیت ساختار نسبت به رشد ترک خستگی که معمول ترین مکانیزم شکست در میل لنگ ها می باشد، شده است.



شکل50: مقایسه تغییرات سختی از سطح تا مغز قطعات برای نمونه‌های شماره 1 و 2

3-3 مراجع

[1] Analysis of a diesel generator crankshaft failure, F.J. Espadafor, J.B. Villanueva, M.T. Garcia, Spain, 2009.

[2] Failure of diesel-engine crankshafts, R.K. Pandey, Department of applied mechanics, Indian institute of technology, 2002.

[3] Analysis of a vehicle crankshaft failure, F.S. Silva, Department of mechanical engineering, university of Minho, Azurem, Portugal, 2003.

[4] Marine main engine crankshaft failure analysis: A case study, M. Fonte, M. de Freitas, Portugal, 2008.

[5] Fatigue and Fracture, ASM Handbook, Vol. 19, 1996.

[6] Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, Hertzberg, 4th Edition, 1995.

فاز 4
جمع بندی

4-جمع بندی

در این تحقیق، نحوهٔ جوشکاری مناسب میل‌لنگ‌های تعمیری و تحلیل دلایل شکست یک نمونه میل‌لنگ جوشکاری شده ارائه شد.

در فاز اول تحقیق، روشهای نگهداری میل‌لنگ برای افزایش عمر و انواع تنشهای وارد به میل‌لنگ بررسی و در ادامه فرایندهای مجاز جوشکاری برای مرمت میل‌لنگها ارائه شد. این فرایندها شامل جوشکاری با الکترود پوشش دار، جوش قوس تنگستن، جوشکاری زیر پودری، فرایندهای پاشش حرارتی و روکش-کاری لیزری بود.

بر اساس بررسی انجام شده در این فاز، بر اساس نوع خرابی، جوشکاری لیزری، به دلیل سرد بودن، برای حالتی که نواحی آسیب دیده محدود و کوچک باشد، مناسب است. برای حالتی که خرابی وسیع است جوشکاری زیر پودری مناسب است اما نقطه ضعف اصلی آن ایجاد تنشهای پسماند در ناحیه جوشکاری شده است. در انتهای این فصل تنشهای وارده به میل لنگ و ضریب اطمینان خستگی میل لنگ مورد مطالعه، شبیه سازی شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی ضریب اطمینان خستگی میل لنگ مورد بررسی 1/21 در بدترین حالت محاسبه شد. این مقدار نشان می-دهد که این نوع میل‌لنگ‌ها، به خصوص در ناحیهٔ انتهایی ژورنال، به شدت به خواص ماده حساس هستند و در صورت جوشکاری باید نهایت دقت جهت حفظ مقاوت خستگی در نظر گرفته شود.

در فاز دوم، ضمن معرفی تنشهای پسماند، بیان شد که تنشهای پسماند کششی ناشی از عملیات ماشین‌کاری و جوشکاری باید طبق یک منحنی دمایی خاص با روشهایی مانند المنت حرارتی یا القایی بر طرف شوند و استفادهٔ مستقیم از مشعل مجاز نیست.

در فاز سوم این پروژه، از میل لنگ مورد مطالعه به منظور تعیین استاندارد ماده و تشخیص تغییرات ریزساختاری و متالورژیکی نمونه برداری شد. تعداد 2 نمونه که یکی از بخش سالم و بدون شکست تحت عنوان نمونه شماره 1 و دیگری از بخش شکسته شده میل لنگ با نام نمونه شماره 2 نمونه برداری انجام پذیرفت. کلیه آزمون‌های شیمیایی، متالوگرافی و مکانیکی اعم از کشش، ضربه و سختی سنجی بر روی هر 2 نمونه انجام شد.

با مطابقت نتایج آزمون کوانتومتری با استاندارد BS EN10250-3 (2000) مشخص گردید متریال فلز پایه در هر 2 نمونه 42CrMo4+QT[35] بوده و این متریال معادل SA-29 Grade 4140 در استاندارد ASME Sec II Part A می باشد. با توجه به تغییرات ریزساختاری و توزیع سختی در نمونه‌های شماره 1 و 2، لازم است در فرایند جوشکاری مورد استفاده در کارگاه تعمیرات میل لنگ بازنگری شده و پیشنهاداتی در خصوص نوع فیلر(الکترود) مورد استفاده، دماهای پیش گرم و عملیات حرارتی پس از جوشکاری ارائه شد. این پیشنهادات در قالب WPS[36] جدیدی ارائه گردیده است که در پیوست 1 ارایه شده است. لازم به ذکر است رعایت کردن دمای پیش گرم و انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری از ضروریات WPS پیشنهادی می باشد. بدیهی است برای استفاده عملی از این WPS لازم است الزامات مربوط به تایید این دستورالعمل در قالب یک PQR[37] برآورده شود.

---

1) Quench Tempered
1) Welding Procedure Specification
2) Procedure Qualification Record

5-پیوست‌ها

پیوست 1

دستورالعمل جوشکاری (WPS) پیشنهادی برای تعمیر میل لنگ مورد بررسی

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION

	WPS No. : **WPS-01**
	REV. No. : **00**
	DATE : **05.Feb.2017**
Welding Process(es) : **SAW**	SUPPORTING PQR : ---
Type(s) : **Automatic**	Page: 1 OF 2
CODES: **ASME IX (2010),**	

JOINTS (QW-402)

BASE METALS(QW-403)

P.No.	Group No.	TO	P.No.	Group No.
		OR		
Specification Type & Grade	**AISI 4140 (42CrMo4)**			
		TO		
Specification Type & Grade	**AISI 4140 (42CrMo4)**			

Base Metal	Groove :	Fillet : **N.A**
FILLER METALS(QW-404)	**SAW**	**SAW**
Spec. No. (SFA)	**5.23**	**5.23**
AWS No.(Class)	**EB2R**	**EB3R**
F. NO.	**6**	**6**
A- NO.	**3**	**3**
SIZE OF FILLER METAL	**3 mm Dia.**	**3 mm Dia.**
Weld Metals Thickness Range: mm Groove Max.	**Root**	**Fill & Cap**
Fillet:	**N.A**	**N.A**
Electrode / Wire Trade Name	**BOHLER or Eq.**	**BOHLER or Eq.**
Electrode - Flux (Class)	**F8P2-EB2R-B2R**	**F9P2-EB3R-B3R**
Flux Trade Name	**BOHLER or Eq.**	**BOHLER or Eq.**

Prepared By: **R.Raeisi** Designation: SIGNATURE:	Reviewed By: SIGNATURE:

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION

	WPS No. WPS-01
	REV. No. : 0
	Page: 2 OF 2

POSITIONS (QW-405) Position(s) of Groove : **1G** Position(s) of Fillet : **N.A**	**POST WELD HEAT TREATMENT (QW-407)** Temperature Range: / Time Range : Min. / Heating Rate Max. / Cooling Rate Max. **PWHT** **690°C±10** / **1 Hr/inch** **Min. 60 minutes** / **150° C /hr** / **150° C/hr**

PREHEAT (QW-406)

Preheat Temp. (Min.) : **200 °C**

Interpass Temp. (Max.) : **320 °C**

Post heat Temp. (Min.) : **350** °C
(2 Hours Continous After Weld)

Preheat Miantenance : **Electrical Ceramic Heater**

GAS (QW-408)

	Gas(es)	Percent composition (Mixture)	Flow Rate
Shielding	**None**	**None**	**None**
Trailing	**None**	**None**	**None**
Backing	**None**	**None**	**None**

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)

Current (A.C/D.C.) : **As Below**	Polarity : **As Below**
Tungesten Electrode Size & Type : **Not Applicable**	Volts (Range): **As Below** Mode of metal Transfer for GMAW : **Not Applicable**

TECHNIQUE (QW-410)

String or Weave bead : **String**	Oscillation : **None**
Max. Weave Width : **Not Applicable**	Contact tube to work distance: **20~25 mm for SAW**
Orifice/Gas cup size : **Not Applicable**	Multiple/Single pass (per side) : **Multiple**
Initial cleaning : **Brushing**	Multiple/Single Electrode(s) : **Single**
Interpass Cleaning : **Grinding or brushing**	Travel speed (Range) : **SEE TABLE**
Method of back gouging : **Not Applicable**	Peening : **Not Applicable**
Other : **None**	

Weld Layer(s)	Process	Filler Material		Current		Volts (Range)	Travel Speed	Heat Input
		Class	Dia	Type & Polarity	Amp. Range		(Range) Cm/min	Max. Kj/cm
Root	**SAW**	**EB2R**	**3 mm**	**DCEP**	**350-480**	**32-35**	**42-50**	**24**
Fill	**SAW**	**EB3R**	**3 mm**	**DCEP**	**350-480**	**32-35**	**42-50**	**24**
Cap	**SAW**	**EB3R**	**3 mm**	**DCEP**	**350-480**	**32-35**	**42-50**	**24**

پیوست 2

گزارش آزمایشهای متالورژیکی