معمای ترک‌های حرارتی و اعوجاج در غلتک‌های خطوط نورد گرم و ریخته‌گری مداوم(CCM) ؛ از تعمیر سطحی تا حل مسئله با تفکر سیستمی



- **حوزه کاربرد :**مجتمع‌های فولادسازی، خطوط نورد گرم (Hot Strip Mills) و ماشین‌های ریخته‌گری مداوم شمش و اسلب(CCM)
- **تهیه و تدوین :**کارگروه مهندسی ساخت، متالورژی و تحلیل سیستم‌های مکانیکی شرکت فربد صنعت ایرانیان

چالش بنیادین در کف کارخانه؛ وقتی سطح غلتک پوست‌ماری می‌شود

در یک خط ریخته‌گری مداوم (CCM) یا سالن نورد گرم فولاد، غلتک‌ها در خط مقدم نبرد میان دما و فشار قرار دارند. در یک لحظه، سطح غلتک با مذاب یا شمش گداخته با دمای بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در تماس مستقیم است و در کسری از ثانیه، نازل‌های آب خنک‌کننده با دمای محیط روی همان سطح می‌پاشند. این چرخه بی‌وقفه و خشن، هزاران بار در هر شیفت کاری تکرار می‌شود.

نتیجه این کشمکش دائمی، پدیده‌ای است که مهندسان خط تولید آن را به خوبی می‌شناسند : **خستگی حرارتی (Thermal Fatigue)** و شکل‌گیری شبکه‌های متراکم از ترک‌های سطحی موسوم به **ترک‌های پوست‌ماری (Fire Cracking)**. این ترک‌ها اگر به موقع مهار نشوند، در اثر فشارهای تماسی و تنش‌های برشی به یکدیگر متصل شده، باعث کنده شدن پوسته‌های فلزی (Spalling) و ایجاد **اعوجاج و خمیدگی (Bending / Camber Deviation)** در بدنه غلتک می‌شوند. در چنین شرایطی، نه تنها عمر غلتک به شدت سقوط می‌کند، بلکه رد ترک‌ها و ناصافی‌ها مستقیماً روی سطح شمش یا ورق نوردشده نقش می‌بندد و کیفیت محصول نهایی کارخانه را با افت جدی و ضایعات پرهزینه مواجه می‌سازد.

پرسش کلیدی مدیران فنی و کارشناسان نگهداری و تعمیرات این است« :*چرا غلتکی که با آنالیز ظاهراً مشابه ساخته یا روکش‌دهی شده، پس از مدت کوتاهی دوباره دچار ترک حرارتی و اعوجاج می‌شود؟* » در **شرکت مهندسی فربد صنعت ایرانیان**، ما معتقدیم پاسخ این پرسش در نگاه محدود به «خودِ غلتک» نهفته نیست؛ بلکه در نادیده گرفتن **تعامل دینامیکی کل سیستم حرارتی، مکانیکی و متالورژیکی خط تولید** است.

بخش اول | تفکر سیستمی در خط تولید؛ بررسی سیکل خنک‌کاری و شرایط واقعی کارکرد

وقتی یک واحد فولادی یا نوردی با مشکل خرابی زودهنگام غلتک‌های CCM یا نورد گرم به فربد صنعت ایرانیان مراجعه می‌کند، ما پیش از هر چیز به جای تمرکز صرف بر ابعاد و متریال غلتک، **کل محیط عملیاتی غلتک را به عنوان یک سیستم واحد** تحلیل می‌کنیم.

یک غلتک در خط ریخته‌گری مداوم یا نورد گرم، هم‌زمان تحت تأثیر گرادیان شدید دمایی در ضخامت، فشار تماسی بالا، بارهای خمشی ناشی از وزن و فشار شمش، و شرایط خنک‌کاری است. اگر فشار یا دبی آب در بخشی از نازل‌های خنک‌کننده به دلیل گرفتگی یا رسوب افت کرده باشد، یا اگر فاصله نازل‌ها با سطح غلتک از مقدار بهینه منحرف شده باشد، توزیع دما در محیط غلتک نامتقارن

می‌شود. این ناهماهنگی دمایی باعث ایجاد **تنش‌های حرارتی نایکنواخت** شده و غلتک را به سمت اعوجاج دائمی و ترک‌خوردگی سوق می‌دهد.

اصل بنیادین مدل مهندسی فربد صنعت:

حل ریشه‌ای مسئله در تجهیزات تحت بار حرارتی و مکانیکی سنگین، بدون درک دقیق از رفتار سیستم در خط تولید ممکن نیست. ما در فربد صنعت، شرایط خنک‌کاری، توزیع دما، تاریخچه تعمیرات و الگوی واقعی تخریب را کنار هم می‌گذاریم تا بدانیم غلتک دقیقاً به چه دلیل و از کدام نقطه شروع به از دست دادن سلامت خود کرده است.

بخش دوم | مهندسی معکوس ساختار دوجنسی و روکش‌دهی آلیاژی؛ مقابله با خستگی حرارتی

بسیاری از تلاش‌های بومی‌سازی در ساخت یا بازسازی غلتک‌ها به دلیل ساده‌سازی بیش از حد مهندسی معکوس با شکست روبه‌رو می‌شوند. در غلتک‌های تخصصی خطوط نورد و ریخته‌گری مداوم، یک متریال واحد به ندرت می‌تواند هم‌زمان همه نیازها را برآورده کند :**مغز و شافت غلتک باید چقرمگی، استحکام کافی و پایداری ابعادی در برابر خمش و بارهای مکانیکی داشته باشند، در حالی که لایه سطحی باید در برابر شوک حرارتی، سایش و ترک‌های پوست‌ماری مقاومت کند.**

در رویکرد مهندسی معکوس شرکت فربد صنعت ایرانیان، بررسی صرفاً به تعیین درصد عناصر شیمیایی محدود نمی‌شود. ما با بهره‌گیری از آزمون‌های متالوگرافی، سختی‌سنجی مقطعی، تحلیل ریزساختار کاربیدها و بررسی توزیع تنش، مکانیزم خرابی را در نمونه مستهلک و قطعه مرجع واکاوی می‌کنیم. چه در **ساخت غلتک‌های دوجنسی (Compound / Bimetal Rolls)** با فرآیند ریخته‌گری و شبیه‌سازی انجماد کنترل‌شده، و چه در **بازسازی و روکش‌دهی آلیاژی (Hardfacing / Cladding)** لایه سطحی با آلیاژهای مقاوم به خستگی حرارتی، هدف اصلی ایجاد پیوند متالورژیکی سالم، عاری از تخلخل و بدون تمرکز تنش در فصل مشترک لایه‌هاست.

بخش سوم | کنترل تنش‌های پسماند در ماشین‌کاری نهایی و عملیات حرارتی

یکی از خطاهای پنهان اما بسیار تعیین‌کننده در ساخت یا بازسازی غلتک‌های طویل و سنگین، **نادیده گرفتن تنش‌های پسماند (Residual Stresses)** ناشی از عملیات حرارتی و براده‌برداری است. غلتک ممکن است در لحظه خروج از کارگاه کاملاً مستقیم و هم‌محور به نظر برسد، اما به محض گرم شدن در خط تولید و آزاد شدن تنش‌های پسماند قفل‌شده در ساختار، دچار تابیدگی و انحراف محوری می‌شود.

در فرآیند مهندسی ساخت در فربد صنعت ایرانیان:

- **مدیریت چرخه‌های حرارتی و تنش‌زدایی :**پیش‌گرم کردن کنترل‌شده، تنش‌زدایی مرحله‌ای و انتخاب سیکل حرارتی متناسب با گرید آلیاژی و مقطع غلتک به گونه‌ای انجام می‌شود که هم یکنواختی ریزساختاری حفظ شود و هم ریسک ایجاد ترک‌های میکروسکوپی یا اعوجاج ناگهانی به حداقل برسد.

- **ماشین‌کاری دقیق و کنترل عمق براده‌برداری :**در مراحل خراطی، سوراخ‌کاری کانال‌های خنک‌کاری داخلی (در صورت وجود) و سنگ‌زنی نهایی، پارامترهای برش و نرخ براده‌برداری به نحوی تنظیم می‌شوند که گرمای موضعی بیش از حد ایجاد نگردد و لایه سطحی دچار تنش کششی مخرب نشود. کنترل دقیق هم‌مرکزی، صافی سطح و تلرانس‌های هندسی پیش از تحویل، تضمین‌کننده عملکرد روان غلتک در مجموعه است.

مقایسه فنی رویکرد سیستم‌محور فربد صنعت با روش‌های سنتی ساخت و بازسازی

شاخص فنی و مهندسی	رویکرد سنتی و جزیره‌ای	مدل حل مسئله فربد صنعت ایرانیان
تحلیل مسئله و خط تولید	تمرکز صرف بر ابعاد و کپی‌کاری قطعه بدون بررسی شرایط خنک‌کاری و الگوی خرابی	تحلیل سیستماتیک سیکل خنک‌کاری، ریشه‌یابی ترک‌های حرارتی و اعوجاج و تدوین صورت‌مسئله دقیق
متالورژی و فناوری ساخت	اتکا به آنالیز شیمیایی ساده و روکش‌دهی یا ساخت بدون توجه به ریزساختار و فصل مشترک	مهندسی معکوس عمیق، کنترل ساختار دوجنسی یا روکش آلیاژی مقاوم به خستگی حرارتی و پایش کیفیت داخلی
عملیات حرارتی و ماشین‌کاری	ماشین‌کاری و عملیات حرارتی بدون مدیریت تنش‌های پسماند و کنترل دقیق اعوجاج	کنترل تنش‌های پسماند در مراحل حرارتی و ماشین‌کاری نهایی و تضمین دقت هندسی و ابعادی
بهره‌برداری و انتقال دانش	تحویل قطعه بدون راهنمای پایش در خط تولید	تدوین دستورالعمل پایش وضعیت برای بهره‌برداران + منتورینگ و ارائه دانش فنی کاربردی در صورت درخواست

بخش چهارم | پایش وضعیت، منتورینگ بهره‌برداران و تحویل دانش فنی

حتی بهترین غلتک مهندسی‌شده نیز اگر پس از نصب در خط نورد یا ریخته‌گری مداوم بدون برنامه پایش رها شود، در معرض عوامل مخرب محیطی قرار می‌گیرد. در مدل کسب‌وکار **فربد صنعت ایرانیان**، ما به جای تحویل یک کالای منفصل، در کنار تیم فنی و بهره‌برداری کارفرما قرار می‌گیریم تا چرخه عمر واقعی غلتک در مدار تولید به حداکثر برسد.

تدوین **دستورالعمل پایش وضعیت (Condition Monitoring)** برای اپراتورها و کارشناسان نت—شامل شاخص‌های کنترل دمای سطحی و آب خنک‌کننده، بازرسی دوره‌ای الگوی ترک‌های سطحی، پایش هم‌راستایی و ثبت روند تغییرات—به تیم بهره‌برداری کمک می‌کند پیش از تبدیل شدن یک ایراد جزئی به توقف اضطراری خط، اقدام اصلاحی انجام دهد. همچنین، در طول فرآیند، **منتورینگ و کوچینگ مهندسی** با زبان کاربردی انجام می‌شود و در صورت درخواست کارفرما، **دانش فنی مسئله** به

صورت مستند و کاربردی در اختیار مجموعه قرار می‌گیرد تا ظرفیت فنی و توان تصمیم‌گیری تیم داخلی کارخانه نیز ارتقا یابد.

جمع‌بندی اجرایی برای مدیران فنی و مهندسی

ظهور زودهنگام ترک‌های پوست‌ماری و اعوجاج در غلتک‌های خطوط نورد گرم و ریخته‌گری مداوم، هشداری جدی نسبت به نگاه تک‌بعدی به ساخت و بازسازی قطعات تحت تنش‌های حرارتی-مکانیکی است. با پیاده‌سازی **تفکر سیستمی**—از تحلیل شرایط خنک‌کاری و مهندسی معکوس متالورژیکی تا کنترل تنش‌های پسماند در ماشین‌کاری و استقرار دستورالعمل پایش وضعیت—می‌توان عمر بهره‌برداری را افزایش داد، کیفیت سطح محصول نهایی را حفظ کرد و هزینه‌های توقف خط را به شکل معناداری کاهش داد.

مراجع، استانداردها و مستندات تخصصی(References)

۱. **ASM Handbook, Volume 1:** Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys — Roll materials for hot rolling and continuous casting applications.
۲. **ASM Handbook, Volume 15:** Casting — Solidification control, bimetallic/compound casting principles, and thermal stress management.
۳. **ISO 10816 / ISO 20816 (Series):** Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts and industrial rotating/process equipment.
٤. **AISE / AIST Technical Reports & Roll Technology Guidelines:** Thermal fatigue, fire cracking mechanisms, and roll wear/spalling analysis in hot strip mills and continuous casting machines.
٥. **ISO 2768 / ISO 1101:** General tolerances and Geometrical Product Specifications (GPS) for heavy cylindrical and machined industrial components.

شرکت مهندسی فربد صنعت ایرانیان | مرجع تخصصی حل مسئله، مهندسی معکوس و ساخت قطعات حساس صنعتی

وب‌سایت رسمی و بانک مقالات تخصصیwww.farbodsanatco.ir

*کلیه حقوق مادی، معنوی، ساختار تحلیلی و دانش فنی مندرج در این سند متعلق به **شرکت مهندسی فربد صنعت ایرانیان** بوده و هرگونه کپی‌برداری، بازنشر یا استفاده تجاری بدون ذکر دقیق منبع و کسب مجوز کتبی پیگرد قانونی دارد.*