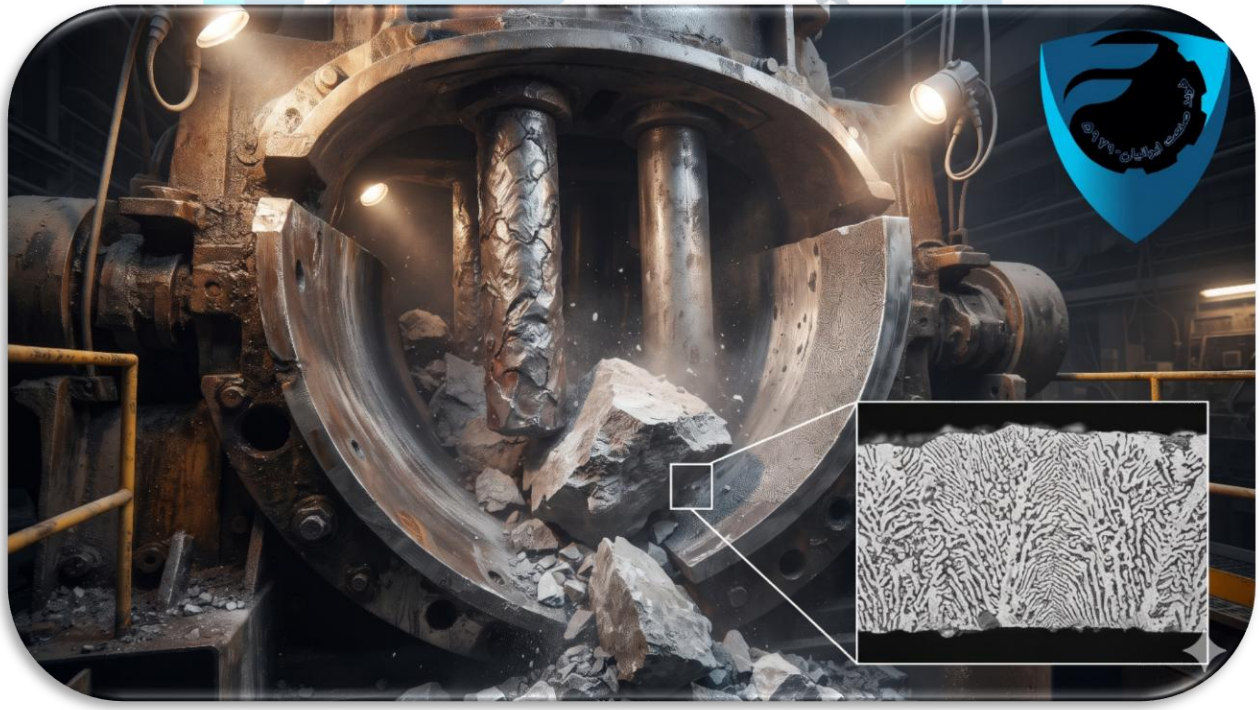
شکست زودهنگام لاینرها، چکش‌ها و قطعات سنگ‌شکن
در صنایع معدن و سیمان
حل تعارض سختی و چقرمگی با تفکر سیستمی



شکست ترد ناگهانی یا سایش برق‌آسای لاینرها، فک‌ها و چکش‌های سنگ‌شکن در مواجهه با سنگ‌های سیلیسی، از یک خطای رایج اما بنیادین ناشی می‌شود: انتخاب آلیاژ بر پایه نام عمومی سنگ یا سختی ظاهری قطعه بدون انطباق با انرژی ضربه، درصد سیلیس آزاد و شاخص سایش باند در هر مرحله از خردایش. فولادهای منگنزی هادفیلد در خردایش اولیه ضربه‌محور از طریق کارسختی دوقلویی به سختی ۵۰۰ تا ۵۵۰ برینل می‌رسند، اما در برخورد با سنگ‌های ریز، نرم یا سایش لغزشی کم‌ضربه کارسخت نشده و در سختی اولیه ۱۹۰ تا ۲۲۰ برینل به سرعت ساییده می‌شوند. در نقطه مقابل، چدن‌های سفید پرکروم با شبکه کاربیدی M7C3 و سختی ۵۸ تا ۶۵ راکول سی، مقاومت سایشی بسیار بالایی در برابر سیلیس دارند، اما با انرژی ضربه حدود ۱۰ ژول بر سانتی‌متر مربع و چقرمگی شکست ۲۰ تا ۳۰ مگاپاسکال ریشه متر، در برخورد با خوراک درشت یا قطعات فلزی سرگردان به صورت فاجعه‌بار خرد می‌شوند.

برای خروج از این دوراهی پرهزینه، مدل مهندسی ساخت شرکت فربد صنعت ایرانیان مسئله را با رویکرد تفکر سیستمی در چهار لایه به هم پیوسته حل می‌کند: تحلیل کمی دانه‌بندی، رطوبت و شاخص سایش خوراک ورودی به جای اکتفا به آنالیز شیمیایی قطعه؛ بازنگری هندسی پروفیل لاینر و چکش برای حذف تمرکز تنش؛ انتخاب مرحله‌به‌مرحله متریال میان گریدهای اصلاح‌شده هادفیلد، چدن‌های پرکروم و کامپوزیت‌های دوجنسی یا سرامیکی؛ و اجرای شبیه‌سازی عددی انجماد با کالیبراسیون ضریب انتقال حرارت قالب جهت حذف تخلخل‌های مرکزی، همراه با منتورینگ تیم نگهداری و تعمیرات کارخانه. باید توجه داشت که داده‌های عمر نسبی ارائه‌شده برای کامپوزیت‌ها و هزینه توقف خط در ادبیات تأمین‌کنندگان، برآوردهای صنعتی وابسته به شرایط کارگاه هستند و هیچ آلیاژ واحدی بدون کنترل هم‌زمان فلزیابی، بالانس روتور و تنظیمات دهانه سنگ‌شکن، پایداری تولید را تضمین نمی‌کند.

بخش اول :

ریشه‌شناسی تخریب در کف معدن و کارخانه سیمان؛ اثر سیلیس و دینامیک خردایش

ساعت سه بامداد در مدار خردایش یک کارخانه سیمان یا واحد فرآوری سنگ‌آهن، صدای کوبش منظم سنگ‌ها ناگهان با یک ضربه خشک و فلزی قطع می‌شود و آمپراژ الکتروموتور به سرعت بالا می‌رود. پس از توقف اضطراری خط و باز کردن دریچه بازدید، مهندسان نگهداری و تعمیرات با یکی از دو سناریوی آشنا روبه‌رو می‌شوند: یا چکش‌ها و لاینرهای پرکرومی که قرار بود عمر خط را افزایش دهند در برخورد با یک رگه سنگ سخت یا تکه آهن سرگردان مانند شیشه متلاشی شده‌اند، یا صفحات فک و منتل‌های منگنزی آن‌قدر سریع ساییده شده و تغییر شکل داده‌اند که پیش از رسیدن به میانه برنامه تولید، زاویه گیره از دست رفته و دبی سنگ‌شکن افت کرده است. هنگامی که پیمانکار سنتی به جای تحلیل محیط واقعی محفظه خردایش، تنها آنالیز شیمیایی نمونه فرسوده را تکرار می‌کند، این چرخه معیوب در خرید بعدی نیز بازتولید می‌شود.

مکانیزم‌های تریبولوژیکی تخریب در مواجهه با سنگ‌های سیلیسی

در برخورد قطعات ضدسایش با کانی‌های حاوی سیلیس آزاد (کوارتز)، تخریب سطحی حاصل برآیند هم‌زمان سایش خراشان شیاردار، سایش ریزبرشی، خستگی تماسی و شکست ترد در مقیاس میکروسکوپی یا ماکروسکوپی است. کوارتز با سختی ۷ در مقیاس موس از سختی بسیاری از سطوح فلزی کارسخت‌شده یا پرکربن (که سطح سایش آن‌ها حدود ۷۰۰ تا ۸۶۰ ویکرز گزارش می‌شود) فراتر می‌رود یا با آن‌ها رقابت می‌کند.

در تریبولوژی، گذار از رژیم سایش خفیف به سایش شدید به نسبت سختی ذره ساینده به سختی سطح فلز (Ha/Hm) و همچنین شکل هندسی ذرات سنگ وابسته است. پژوهش‌های کلاسیک سایش نشان می‌دهد که نخستین جهش نرخ سایش در نسبت Ha/Hm بین ۰/۷ تا ۱/۱ و جهش دوم در بازه ۱/۳ تا ۱/۷ رخ می‌دهد و ضریب اصطکاک نیز تا نسبت حدود ۳/۳ به صورت متناسب افزایش می‌یابد. هنگامی که بار تماسی کم و Ha کمتر از

Hm باشد، مکانیزم غالب خستگی تماسی است؛ اما با تیز و زاویه‌دار بودن ذرات کوارتز و افزایش اندازه دانه (که زاویه حمله ساینده را بزرگ‌تر می‌کند)، دانه‌های سیلیس همانند قلم‌های برشی میکروسکوپی عمل کرده و با مکانیزم ریزبرشی شیارهای باریک و عمیق بر سطح فلز ایجاد می‌کنند، در حالی که ذرات گردتر بیشتر به تغییر شکل پلاستیک و شیارزنی هموار منجر می‌شوند. نکته ظریف آن است که سختی حجمی اولیه فلز پیش از سایش، همبستگی ضعیفی با مقاومت واقعی به سایش دارد و آنچه رفتار نهایی را تعیین می‌کند «سختی معادل» لایه تغییرشکل‌یافته سطحی حین سایش است.

ویژگی‌های خوراک ورودی و پارامترهای بهره‌برداری سنگ‌شکن

یکی از اشتباهات متداول در کارخانه‌های سیمان و معادن، اکتفا به نام سنگ معدن برای انتخاب متریال است. راهنماهای فنی سازندگان قطعات سنگ‌شکن نشان می‌دهند که حتی سنگی با نام عمومی «آهک» بسته به زمین‌شناسی معدن، از مقاومت فشاری ۳۰ تا ۲۵۰ مگاپاسکال را در بر می‌گیرد و وجود رگه‌های سیلیسی می‌تواند یک سنگ آهک معمولی را از نظر ساینده‌گی به رفتاری نزدیک به سنگ‌های سخت تبدیل کند. به همین دلیل، شاخص فنی معتبر برای انتخاب متریال، نه سختی موس به تنهایی، بلکه درصد سیلیس آزاد و شاخص سایش باند (Bond Abrasion Index, Ai) است. بر پایه یک راهنمای فنی سازندگان سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای افقی (HSI)، خوراک با سیلیس کمتر از ۱۵ درصد شرایط ایده‌آل را ایجاد می‌کند، بازه ۱۵ تا ۴۰ درصد نیازمند متالورژی تخصصی است و خوراک با سیلیس بالای ۴۰ درصد یا شاخص کار باند بسیار بالا، سایش چکش‌ها را به حدی می‌رساند که استفاده از سنگ‌شکن ضربه‌ای از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نخواهد بود.

در کنار کانی‌شناسی سنگ، توزیع دانه‌بندی و رطوبت خوراک تعادل میان ضربه و سایش را تغییر می‌دهد. ورود بلوک‌های بسیار درشت در خردایش اولیه (تا حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر در برخی سنگ‌شکن‌های اولیه و حتی ۱۳۰۰

میلی‌متر در مدل‌های بزرگ) یا ورود سنگ‌های بزرگ‌تر از دهانه پورت روتور در سنگ‌شکن‌های VSI، ضربات موضعی شدیدی ایجاد می‌کند که قطعات ترد را می‌شکند. از سوی دیگر، ورود نرمه‌های زیاد بدون سرند کردن اولیه با گریزلی فیدر، موجب فشرده‌شدن بستر و سایش بدون کارسختی می‌شود. همچنین، بر اساس برآورد راهنماهای فنی، رطوبت بالای ۵ درصد سبب چسبیدن نرمه‌ها به توری‌ها و گلوگاه خروجی شده و پدیده خفگی (Choking) را پدید می‌آورد که هم دبی را متوقف می‌کند و هم تنش‌های حرارتی و ضربه‌ای را بر لاینرها تشدید می‌نماید.

پارامترهای سینماتیکی سنگ‌شکن نیز مستقیماً سرنوشت قطعه را رقم می‌زنند. در سنگ‌شکن‌های فشاری (فکی، ژیراتوری و مخروطی)، سرعت حرکت فک یا منتل در محدوده آهسته ۵/۰ تا ۵/۱ متر بر ثانیه است و خردایش با فشار مکانیکی انجام می‌شود؛ در این تجهیزات، کارکرد با دهانه بسته خروجی (CSS) کوچک‌تر از حد مجاز دفترچه فنی، تغییر زاویه گیره (Nip Angle) بر اثر سایش و تغذیه قطره‌ای به جای تغذیه پر (Choke Feeding)، بارگذاری نامتقارن و سایش موضعی را تشدید می‌کنند. در مقابل، در سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای افقی سرعت نوک پره روتور معمولاً ۳۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه و در سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای عمودی (VSI) بین ۴۰ تا ۷۵ متر بر ثانیه است. چون انرژی جنبشی سنگ با مجذور سرعت تغییر می‌کند ($E = 0.5 \times m \times v^2$)، بالا بردن سرعت روتور از ۴۵ به ۶۰ متر بر ثانیه انرژی ضربه به ازای هر کیلوگرم سنگ را به حدود ۱۸۰۰ ژول می‌رساند؛ جهشی که کوچک‌ترین عیب داخلی یا ضربه ناشی از حضور قطعات فولادی سرگردان مانند میلگرد یا ناخن بیل مکانیکی را به شکست آنی قطعه تبدیل می‌کند.

نکته منبع‌شناختی: داده‌های مقاومت فشاری، درصد سیلیس و شاخص Ai در جدول بالا برگرفته از راهنماهای فنی تأمین‌کنندگان قطعات ضدسایش سنگ‌شکن در چارچوب روش باند است و در مواردی مانند گرانیت، ارقام

دقیق فشاری و Ai به صورت کمی در دسترس نبوده و به صورت کیفی گزارش شده‌اند.

نوع خوراک ورودی	سختی موس	مقاومت فشاری(MPa)	درصد سیلیس (SiO2)	شاخص سایش باند(Ai)	مکانیزم غالب تخریب و چالش بهره‌برداری	نوع خوراک ورودی
سنگ آهک تمیز تا متوسط	متغیر بسته به معدن	۳۰ تا ۲۵۰	۲ تا ۱۰ درصد	۰۵/۰ تا ۲/۰	ضربه‌محور با سایش کم؛ در نوع نرم، عدم کارسختی کامل فولاد منگنزی	سنگ آهک تمیز تا متوسط
سنگ آهک حاوی رگه‌های سیلیسی	متغیر تا ۷ موضعی	تا ۲۵۰	متوسط بازه ۱۵ تا ۴۰ درصد برای HSI تخصصی	متوسط تا بالا	هم‌زمانی ضربه سنگین و خراش سیلیس؛ سایش سریع گریدهای ساده	سنگ آهک حاوی رگه‌های سیلیسی
گرانیت	۶ تا ۷	بالا	بالا	بالا	در ابعاد درشت بار ضربه‌ای بالا؛ در مدارهای تمیز ثانویه و ثالثیه سایش شدید	گرانیت
شن رودخانه‌ای و کوارتز	۷ کوارتز	۱۰۰ تا ۲۵۰	بالا	۴/۰ تا ۶/۰	سایش لغزشی و ریزبرشی شدید؛ نیازمند سختی بسیار بالا	شن رودخانه‌ای و کوارتز
بتن بازیافتی	۳ تا ۶ (مخلوط)	متغیر	متغیر	متغیر	سایش بالا همراه با خطر شدید شکست ترد ناشی از میلگرد و فلزات سرگردان	بتن بازیافتی

بخش دوم :

مقایسه متالورژیکی و آستانه‌های انتخاب هوشمندانه مواد

انتخاب متریال در مدار خردایش نباید در سطح کل کارخانه انجام شود، بلکه باید برای هر تجهیز و هر ناحیه از محفظه خردایش به صورت مجزا تصمیم‌گیری کرد. دو خانواده اصلی آلیاژهای ریختگی سنگ‌شکن، یعنی فولادهای آستنیتی منگنزی هادفیلد و چدن‌های سفید پرکروم، دو راهبرد متالورژیکی متفاوت را در برابر تنش‌های تماس و ضربه پیاده‌سازی می‌کنند.

فولادهای منگنزی هادفیلد و گریدهای اصلاح‌شده (ASTM A128)

فولاد هادفیلد کلاسیک که بر مبنای نسبت تقریبی ۱۰ به ۱ منگنز به کربن (۱۱ تا ۱۴ درصد منگنز و حدود ۱/۰ تا ۴/۱ درصد کربن) فرموله می‌شود، پس از عملیات حرارتی انحلالی و کوئنچ آبی دارای ساختار تک‌فاز آستنیتی در دمای محیط است. این آلیاژ در حالت تحویلی، استحکام کششی نهایی حدود ۹۶۵ مگاپاسکال، تنش تسلیم اولیه حدود ۳۴۵ تا ۴۱۵ مگاپاسکال (در برخی مطالعات ۲۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال)، ازدیاد طول ۵۰ درصد و کاهش سطح مقطع ۴۰ درصد دارد. سختی اولیه آن تنها ۱۹۰ تا ۲۲۰ برینل است، اما زیر بار ضربه‌ای و فشاری، تنظیم انرژی نقص انباشتگی (SFE) در بازه ۱۵ تا ۴۰ میلی‌ژول بر متر مربع موجب فعال شدن دوقلویی‌های مکانیکی (TWIP) و درهم‌تنیدگی نابجایی‌ها می‌شود و سختی لایه سطحی را به ۵۰۰ تا ۵۵۰ برینل می‌رساند، در حالی که مغز قطعه همچنان چقرمه باقی می‌ماند.

محدودیت اصلی هادفیلد استاندارد (ASTM A128 گرید A)، تنش تسلیم پایین در ساعات نخست بهره‌برداری و ناتوانی در کارسختی در محیط‌های لغزشی بدون ضربه است. برای رفع این نقیصه در شرایط سخت معدنی، گریدهای اصلاح‌شده بر اساس ضخامت مقطع و شدت سایش به کار گرفته می‌شوند. گریدهای B-1 تا B-4 با تنظیم کربن از ۹۰/۰ تا ۴۵/۱ درصد و منگنز ۵/۱۱ تا ۱۴ درصد، امکان کاهش کربن در مقاطع ضخیم (برای جلوگیری از ترک کاربید مرزدانه‌ای) و افزایش کربن در مقاطع نازک را فراهم می‌کنند. گرید C با افزودن ۵/۱ تا ۵/۲ درصد کروم به ترکیب ۰۵/۱ تا ۳۵/۱ درصد کربن و ۵/۱۱ تا ۱۴ درصد منگنز، تنش تسلیم اولیه و مقاومت سایشی پیش

از تکمیل کارسختی را افزایش می‌دهد؛ در کاربردهای سنگین فکی و مخروطی نیز آلیاژهای پرمنگنز کروم‌دار با ۱۸ تا ۲۲ درصد منگنز (Mn18Cr2 و Mn22Cr2) برای سنگ‌های سخت استانداردهای رایج‌تری هستند.
همچنین، برای مقاطع بسیار ضخیم با دیواره بیش از ۱۰۰ میلی‌متر نظیر کاسه‌های سنگ‌شکن مخروطی، مقعرهای ژیراتوری و چکش‌های سنگین، گریدهای E-1 و E-2 حاوی ۹/۰ تا ۱/۲ درصد مولیبدن ضروری هستند تا هنگام سرد شدن مغز قطعه از رسوب کاربیدهای ترد در مرز دانه‌ها جلوگیری شود.

چدن‌های سفید پرکروم (ASTM A532) و کامپوزیت‌های دوجنسی

در چدن‌های سفید پرکروم، افزایش کروم به بالای ۱۰ درصد ساختار کاربیدهای یوتکتیک را از کاربیدهای پیوسته و نرم‌تر M3C (رایج در چدن‌های سفید کم‌آلیاژ یا Ni-Hard نسل قدیم) به سمت کاربیدهای کروم ناپیوسته و شش‌ضلعی M7C3 با ریزسختی بیش از ۱۲۰۰ ویکرز هدایت می‌کند که در زمینه‌ای مارتنزیتی یا آستنیتی قرار گرفته‌اند. برای حفظ تعادل میان مقاومت به سایش و جلوگیری از تردی مفرط، کسر حجمی کاربیدهای یوتکتیک در محدوده ۳۰ تا ۳۵ درصد کنترل شده و از ترکیب‌های هایپریوتکتیک که کاربیدهای درشت اولیه تولید می‌کنند پرهیز می‌شود.

در استاندارد ASTM A532، دو کلاس اصلی در قطعات سنگ‌شکن کاربرد دارند: کلاس II (از جمله تیپ B یا ۱۵ درصد کروم-مولیبدن با ۱۴ تا ۱۸ درصد کروم، ۰۰/۲ تا ۳۰/۳ درصد کربن و تا ۳ درصد مولیبدن، و تیپ D با ۱۸ تا ۲۳ درصد کروم، ۰/۲ تا ۳/۳ درصد کربن و ۵/۰ تا ۵/۱ درصد مولیبدن) و کلاس III تیپ A (حداقل ۲۳ درصد و معمولاً ۲۳ تا ۲۸ درصد کروم، ۴/۲ تا ۶/۳ درصد کربن و تا ۵/۱ درصد مولیبدن که علاوه بر سایش، مقاومت به خوردگی نیز ارائه می‌دهد). نقش مولیبدن همراه با مقادیر کنترل‌شده نیکل یا مس در جلوگیری از تشکیل پرلیت نرم درون مقاطع ضخیم و تضمین زمینه تمام‌مارتنزیتی با سختی ۵۸ تا ۶۵ راکول سی (۵۵۰ تا ۷۰۰ برینل و در برخی گریدها تا ۷۰۰–۸۰۰ برینل) حیاتی است. بر اساس داده‌های

مقایسه‌ای تأمین‌کنندگان، نرخ سایش چدن پرکروم (۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر مکعب بر کیلوگرم) در برابر فولاد کم‌کربن (۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر مکعب بر کیلوگرم) عمری حدود ۱۰ تا ۲۵ برابر در سایش لغزشی ایجاد می‌کند و پژوهش‌های آزمایشگاهی نیز سایش خراشان بسیار کمتر آن را نسبت به فولاد هادفیلد تأیید می‌کنند.

برای غلبه بر ضعف ذاتی چدن پرکروم در برابر شکست ترد، دو فناوری کامپوزیتی توسعه یافته‌اند. نخست، ریخته‌گری کامپوزیتی دوجنسی (Bimetallic Liquid-Hot Composite) است که در آن ساقه و ناحیه پین‌خور چکش از فولاد آلیاژی چقرمه و سر درگیر با سنگ از چدن پرکروم با سختی بالای ۶۲ راکول سی با پیوند متالورژیکی مذاب ریخته‌گری می‌شود تا ارتعاشات روتور ساقه را نشکند. دوم، کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با سرامیک (Ceramic MMC) است که در آن‌ها اینزرت‌های سرامیکی بسیار سخت نظیر آلومینا یا کاربید تیتانیوم (TiC) در زمینه چدن پرکروم، فولاد مارتنزیتی یا حتی فولاد منگنزی Mn18Cr2 نشانده می‌شوند. گزارش‌های فنی تأمین‌کنندگان نشان می‌دهد که افزودن اینزرت‌های سرامیکی به چکش‌های پرکروم می‌تواند عمر قطعه را ۲ تا ۳ برابر چدن پرکروم ساده و تعبیه اینزرت‌های TiC در بخش پایینی لاینرهای Mn18Cr2 عمر قطعه را ۵/۱ تا ۲ برابر افزایش دهد، مشروط بر آنکه فلزیاب و مگنت جداکننده در خط فعال باشند.

آستانه‌های انرژی ضربه و مرزهای کاربردی

تحلیل داده‌های مکانیکی نشان می‌دهد که شکاف چقرمگی میان دو خانواده بسیار عمیق است: چدن پرکروم تیپ ۲۰ تا ۲۶ درصد کروم تنها

حدود ۱۰ ژول بر سانتی‌متر مربع انرژی ضربه را تحمل می‌کند و چقرمگی شکست (KIC) زمینه ۲۵ درصد کروم در حدود ۲۰ تا ۳۰ مگاپاسکال ریشه متر قرار دارد (هرچند ترکیب‌های اصلاح‌شده آزمایشگاهی تا ۴۰ مگاپاسکال ریشه متر نیز گزارش شده‌اند). در مقابل، فولاد هادفیلد با ازدیاد طول ۵۰ درصد، انرژی ضربات سنگین را از طریق تغییر شکل پلاستیک جذب می‌کند.

بر همین مبنا، مرز تصمیم‌گیری کاملاً شفاف است: در سنگ‌شکن‌های اولیه با خوراک درشت، بارهای ضربه‌ای متغیر یا حضور آهن سرگردان (مانند بازیافت بتن)، چدن پرکروم در همان ضربه اول خرد می‌شود و تنها گزینه مطمئن، فولاد منگنزی هادفیلد اصلاح‌شده (گرید E در مقاطع ضخیم یا Mn18Cr2) یا در شرایط سایش بسیار بالا، کامپوزیت مارتنزیتی با ساقه چقرمه است. برعکس، در سنگ‌شکن‌های ثانویه و ثالثیه، چکش‌های HSI با خوراک تمیز و دانه‌بندی کنترل‌شده و کفشک‌ها یا لاینرهای VSI با سایش لغزشی شدید و بدون ضربات کوبشی سنگ‌های بزرگ، فولاد هادفیلد به دلیل ناتوانی در رسیدن به آستانه تنش کارسختی به سرعت ساییده می‌شود و چدن سفید پرکروم کلاس II یا کامپوزیت سرامیکی بیشترین بازده اقتصادی را به ارمغان می‌آورد. همچنین باید توجه داشت که در هیچ شرایطی نباید قطعات هادفیلد را در حین بهره‌برداری یا جوشکاری بالای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم کرد، زیرا در محدوده ۴۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد کاربیدهای ترد ظرف چند دقیقه در مرز دانه‌ها رسوب کرده و قطعه را مانند شیشه می‌شکنند.

شرط منع مصرف و ریسک اصلی	کاربرد بهینه در سنگ‌شکن	شاخص چقرمگی	سختی (تحویلی / کاری)	ریزساختار و مکانیزم مقاومت	خانواده آلیاژی و استاندارد

سایش لغزشی خالص با سنگ ریز و نرم (عدم کارسختی و سایش سریع)	فک و چکش اولیه با ضربه سنگین و خوراک درشت	بسیار بالا (ازدیاد طول حدود ۵۰ درصد)	HB ۲۲۰–۱۹۰ اولیه؛ ۵۰۰–۵۵۰ HB کارسخت	آستنیت تک‌فاز؛ کارسختی با دوقلویی مکانیکی زیر ضربه	فولاد هادفیلد استاندارد (ASTM A128 Gr. A)
گرمایش یا جوشکاری غیراصولی بالای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد	منتل و کانکیو مخروطی، مقعر ژیراتوری، فک سنگ‌های سخت	بالا حتی در دیواره بالای ۱۰۰ میلی‌متر (با Mo)	HB حدود ۲۲۰ +تا ۵۵۰ HB در سطح کارسخت	آستنیت پایدار با تسلیم بالاتر و بدون کاربید مرزدانه‌ای در ضخامت زیاد	هادفیلد اصلاح‌شده (Gr. C, E-1/E-2, Mn18Cr2)
ورود آهن سرگردان یا بلوک‌های درشت با ضربه بالا (شکست ترد)	چکش‌های HSI ثانویه/ثالثیه با خوراک تمیز و سایش سیلیسی شدید	پایین (حدود ۱۰ ژول/سانتی‌متر مربع؛ KIC حدود ۲۰–۳۰ مگاپاسکال ریشه متر)	۵۸–۶۵ HRC (۵۵۰–۷۰۰+ HBW)	کاربیدهای ناپیوسته M7C3 در زمینه مارتنزیتی	چدن سفید پرکروم (ASTM A532 Class II / III)
فقدان آشکارساز فلزات و مگنت در مدار تغذیه	چکش‌های HSI در سنگ سیلیسی و مرطوب؛ کانکیو با اینزرت TiC	ترکیبی عالی (مقاومت ساقه + سختی سطح)	بالای ۶۲ HRC در سطح کار یا سرامیک؛ ساقه چقرمه	پیوند متالورژیکی ساقه چقرمه با سر پرکروم یا اینزرت TiC/Al2O3	کامپوزیت دوجنسی و سرامیکی (Bimetal / MMC)

بخش سوم | مهندسی معکوس واقعی، بازنگری هندسی و شبیه‌سازی انجماد

کپی‌کاری سطحی از روی یک لاینر یا چکش مستهلک، معمولاً دو خطای پنهان را وارد قطعه جدید می‌کند: انتقال اعوجاج و کاهش ضخامت ناشی از سایش قطعه نمونه به نقشه جدید، و تکرار تخلخل‌های انقباضی مرکزی که به دلیل هندسه تغییریافته مقطع در ریخته‌گری رخ می‌دهند.

اصول مهندسی معکوس سه‌مرحله‌ای و بازنگری هندسه لاینر و چکش

در رویکرد مهندسی فربد صنعت ایرانیان، مهندسی معکوس تنها استخراج نقشه از قطعه فرسوده نیست، بلکه فرآیندی سه‌مرحله‌ای است: نخست، تحلیل عملکردی و درک تعامل قطعه با قطعات مجاور در محفظه سنگ‌شکن؛ دوم، اسکن سه‌بعدی و کروکی‌برداری برای بازسازی پروفیل اصلی و حذف خطاهای ناشی از سایش و تغییر شکل؛ و سوم، مهندسی معکوس دقیق متالورژیکی شامل آزمایش‌های XRF، کوانتومتری، سختی‌سنجی مقطعی و متالوگرافی.

بازنگری هوشمندانه در هندسه قطعه اغلب بیش از تغییر گرید آلیاژ به افزایش عمر کمک می‌کند. در صفحات سنگ‌شکن فکی، انتخاب پروفیل دنده باید منطبق با جنس سنگ باشد: پروفیل دندانه‌دار عمیق (Quarry Tooth) در سنگ‌های سخت و ساینده چنگش و حجم سایش‌پذیر بیشتری ایجاد می‌کند، در حالی که پروفیل صاف سنگین (Heavy Duty Flat) بر روی فک ثابت از تمرکز تنش نقطه‌ای می‌کاهد. افزون بر این، حذف گوشه‌های تیز و افزایش شعاع انحنای فیلت‌ها در ریشه چکش‌ها و شیارهای پشت لاینر، ضریب تمرکز تنش را کاهش می‌دهد. در قطعات فولاد منگنزی نیز به دلیل دشواری کوئنچ کامل مغز در مقاطع ضخیم، طراح باید حتی‌الامکان از افزایش ضخامت مقطع فراتر از ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر پرهیز کند یا با بازطراحی شیارهای پشتی، توزیع ضخامت را یکنواخت سازد.

فیزیک انجماد، حذف تخلخل‌های مرکزی و کنترل ذوب

بسیاری از چکش‌ها و صفحات فکی که در ظاهر سالم هستند، از وسط دو نیم می‌شوند زیرا در زمان انجماد در قالب، تخلخل انقباضی و ترک‌های میکروسکوپی در خط مرکزی قطعه شکل گرفته است. فولاد منگنزی هادفیلد دارای دو خاصیت ترموفیزیکی دشوار است: هدایت حرارتی آن بسیار پایین و در حدود ۱۳ وات بر متر کلوین در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (حدود یک‌سوم فولادهای کم‌آلیاژ کربنی) است، در حالی که ضریب انبساط حرارتی آن ۱/۱۸ تا ۴/۱۹ میکرون بر متر کلوین (۵/۱ تا ۲ برابر فولاد کربنی) و انقباض خطی آن حدود ۵/۲ تا ۰/۳ درصد است. هدایت حرارتی پایین باعث می‌شود اختلاف دمای شدیدی (ΔT) بین پوسته منجمدشده و مرکز مذاب ایجاد شود. هم‌زمان، آخرین مایع بین‌دندریتی در مرز دانه‌ها از کربن، اکسیژن و فسفر غنی شده و فازهای تردی شامل کاربیدها، اکسیدها و یوتکتیک فسفیدی بر جای می‌گذارد. هنگامی که تنش حرارتی ناشی از انقباض با یک عیب داخلی به طول ترک اولیه a هم‌زمان شود،

از نظر فناوری قالب‌گیری نیز سرباره فولاد منگنزی خاصیت قلیایی دارد و در تماس با ماسه سیلیسی اسیدی دچار واکنش شیمیایی و سوختگی شدید ماسه (Sand Fusion) می‌شود؛ بنابراین استفاده از ماسه‌های خنثی یا قلیایی نظیر کرومیت و منیزیت (یا پوشش‌های محافظ منیزیتی) برای سطوح حساس، همراه با به‌کارگیری مغزه‌های گلوگاه‌شکن (Knock-off Cores) زیر تغذیه‌ها جهت جداسازی ایمن تغذیه پیش از عملیات حرارتی، از الزامات ریخته‌گری سالم است.

در طراحی تغذیه‌گذاری صفحات فکی دندانه‌دار بر اساس قانون شورینوف (Chvorinov)، بخش قعر دندانه نازک‌ترین و تاج دندانه ضخیم‌ترین مقطع قطعه است و تغذیه باید مدولی دست‌کم ۲/۱ برابر مدول قطعه داشته باشد (Mr ≥ 1.2 Mc). اما هندسه دندانه‌ها و شیارهای پشتی فک اجازه قرار دادن تغذیه در بالای صفحه را نمی‌دهد و تغذیه‌گذاری جانبی و محوری محدوده تغذیه‌رسانی (Feeding Distance) را محدود می‌کند. راهکار قطعی در فربد صنعت ایرانیان، استفاده از شبیه‌سازی عددی پر شدن قالب و

انجماد در نرم‌افزارهایی همچون SUTCAST و ProCAST همراه با **کالیبراسیون دقیق ضریب انتقال حرارت قالب (HTCP)** است. همان‌گونه که در پروژه‌های ریخته‌گری قطعات ضدسایش ثابت شده، استفاده از ضرایب پیش‌فرض نرم‌افزار موقعیت واقعی حفره انقباضی را با خطا پیش‌بینی می‌کند؛ اما با تنظیم دقیق HTCP، چیدمان سیستم راهگاهی پیرامونی، نصب مبردهای فلزی (Chills) در مقاطع ضخیم و کنترل انجماد جهتی، معیار نیاما (Niyama Criterion) بهبود یافته و تخلخل‌های مرکزی به طور کامل به درون تغذیه رانده می‌شوند. هم‌زمان، کنترل دقیق ناخالصی‌هایی چون فسفر و گازهای محلول همراه با به‌کارگیری فناوری میکروآلیاژها در ذوب‌سازی، ساختار دانه‌ای هنگام انجماد را ریزتر کرده و مقاومت قطعه در برابر ترک گرم و عملیات حرارتی را ارتقا می‌دهد.

پروتکل‌های عملیات حرارتی؛ آستنیته‌کردن هادفیلد و بی‌ثبات‌سازی پرکروم

حتی قطعه‌ای با انجماد کاملاً بی‌عیب در صورت اجرای نادرست سیکل حرارتی در کوره از بین می‌رود. برای فولاد منگنزی هادفیلد (ASTM A128)، عملیات حرارتی انحلالی و کوئنچ آبی طبق گام‌های زیر اجرا می‌شود:

۱. گرم‌کردن تدریجی قطعه از ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ کنترل‌شده حدود ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت و توقف ۳ ساعته در ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برای جلوگیری از ترک شوک حرارتی ناشی از هدایت حرارتی پایین.

۲. ادامه گرمایش با نرخ کنترل‌شده تا دمای انحلالی ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.

۳. نگهداری در دمای بیشینه به مدت ۱ ساعت به ازای هر ۴/۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) ضخامت مقطع به اضافه ۱ ساعت اضافی جهت انحلال کامل کاربیدهای مرزدانه‌ای در آستنیت.

٤. انتقال سریع و غوطه‌ورسازی قطعه در حوضچه آب متلاطم (با دمای کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد و گردش مستمر) در زمانی کمتر از ۴۰ ثانیه پس از باز شدن درِ کوره، تا ساختار تک‌فاز آستنیتی بدون رسوب مجدد کاربید تثبیت شود.

در مقابل، برای چدن‌های سفید پرکروم (ASTM A532) که ماهیتی ترد و شکننده دارند، چیدمان ایمن در سبد کوره، کنترل اتمسفر و نرخ گرمایش آهسته برای جلوگیری از شوک حرارتی الزامی است. سپس عملیات حرارتی بی‌ثبات‌سازی (Destabilization) طبق توالی زیر انجام می‌گیرد:

۱. گرم‌کردن کنترل‌شده تا دمای ۹۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد (برای کلاس II معمولاً ۹۵۰ تا ۱۰۱۰ درجه سانتی‌گراد و در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد).

۲. نگهداری به مدت ۱ تا ۶ ساعت جهت رسوب کاربیدهای ثانویه ریز M7C3 درون زمینه آستنیتی و کاهش اشباع کربن و کروم در زمینه.

۳. سرد کردن سریع کنترل‌شده (کوئنچ هوایی یا پلیمری متناسب با ضخامت و عناصر سختی‌پذیر همچون مولیبدن) برای تبدیل زمینه به مارتنزیت سخت با آستنیت باقیمانده کنترل‌شده، و در ادامه تنش‌زدایی در دمای پایین.

بخش چهارم :

ماشین‌کاری تکمیلی، مونتاژ، بالانس دینامیکی و پایش وضعیت

تفکر سیستمی در ساخت قطعات ضدسایش ایجاب می‌کند که طراح و ریخته‌گر، چالش‌های ماشین‌کاری، نصب در سایت و پایش وضعیت حین کار را پیش‌بینی کنند؛ زیرا درصد بالایی از شکست لاینرها و چکش‌ها در همین مراحل رقم می‌خورد.

ماشین‌کاری نشیمنگاه، رزین‌ریزی و پروتکل آچارکشی مجدد

هر دو خانواده هادفیلد و چدن پرکروم به سختی ماشین‌کاری می‌شوند. در فولاد هادفیلد، ترکیب کارسختی فوری و هدایت حرارتی پایین (حدود ۱۳ تا ۲/۱۶ وات بر متر کلوین) لبه ابزار برش را به سرعت تخریب می‌کند؛ بنابراین سطوحی مانند سوراخ پیچ‌ها و جای خارها باید تا حد امکان با ماهیچه‌های دقیق نزدیک به شکل نهایی ریخته‌گری شوند و در موارد ضروری، ماشین‌کاری با دستگاه‌های صلب، ابزارهای CBN یا کاربیدی با زاویه براده منفی و برش عمیق در زیر لایه کارسخت‌شده و بدون توقف ابزار انجام گیرد. در چدن‌های سفید پرکروم نیز استفاده از اینزرت‌های چدن خاکستری در ناحیه غیرساینده نشیمن (ریخته‌گری دوجنسی) یا اعمال آنیل کامل پیش از ماشین‌کاری و محافظت از سطوح تراش‌خورده در مرحله سخت‌کاری نهایی ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، دقت هندسی را تضمین می‌کند.

در مرحله نصب لاینر روی بدنه سنگ‌شکن، صافی سطح نشیمنگاه و پر کردن فضای پشت لاینرهای مخروطی و فکی با ترکیب رزین اپوکسی پشت‌بند (Epoxy Backing) از لقی و خمش نقطه‌ای قطعه جلوگیری می‌کند. نکته حیاتی در لاینرهای منگنزی، پدیده جریان پلاستیک و پهن‌شدگی (Plastic Flow / Peening) در ساعات اولیه کارکرد است که سبب افت پیش‌بار پیچ‌ها و گوه‌ها می‌شود. به همین دلیل، اجرای برنامه دقیق آچارکشی مجدد (Re-torque) در فواصل ۲ ساعت، ۸ تا ۱۲ ساعت و ۲۴ ساعت پس از راه‌اندازی سنگ‌شکن، از کوبش لاینر و بریدن پیچ‌ها جلوگیری می‌کند.

بالانس دینامیکی چکش‌ها روی روتور سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای

در سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای (HSI و آسیاب‌های چکشی)، تعویض یک چکش به تنهایی یا نصب چکش‌هایی با اختلاف وزن، تعادل روتور را به شدت بر هم می‌زند. یک نامتعادلی به اندازه تنها ۱۰۰ گرم روی روتوری که با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می‌چرخد، نیروی گریز از مرکزی معادل حدود ۵۰ ضربه چکشی در ثانیه بر یاتاقان‌ها وارد می‌آورد. افزون بر این، به دلیل طول زیاد روتورهای HSI، بالانس استاتیکی کافی نیست؛ زیرا اگر دو چکش نامتعادل با اختلاف ۱۸۰ درجه در دو انتهای مخالف روتور نصب شوند، به ظاهر در حالت ایستاده متعادل‌اند اما حین چرخش یک گشتاور خمشی مخرب ایجاد می‌کنند که نیازمند بالانس دینامیکی دوصفحه‌ای است.

بر اساس استاندارد ISO 21940-11 (جایگزین ISO 1940-1)، روتور سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای معمولاً در گرید بالانس G16 (و برای سرعت‌های بالاتر در VSI در بازه G6.3 تا G16) نگه داشته می‌شوند. مهندسان نت برای کنترل هم‌وزنی جفت چکش‌های روبه‌روی هم، تلرانس جرم مجاز هر چکش را طبق روابط مربوطه محاسبه می‌کنند

حداکثر اختلاف جرم مجاز برای هر قطعه است. حفظ این تعادل، عمر خستگی یاتاقان‌های غلتکی را که طبق رابطه (C/P) ∝ L10^(۳/۱۰) به شدت تابع بار شعاعی است، به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

چک‌لیست پایش وضعیت و اقتصاد هزینه به ازای هر تن (TCO)

تصمیم‌گیری بر مبنای قیمت اولیه خرید قطعه، در حالی که برآورد یک گزارش تخصصی تأمین‌کنندگان (BDI Wear Parts) هزینه توقف اضطراری

را برای یک معدن ۳۰۰ تنی بین ۲,۰۰۰ تا ۵,۰۰۰ دلار در ساعت، برای یک واحد ۶۰۰ تنی بین ۵,۰۰۰ تا ۱۰,۰۰۰ دلار در ساعت و برای معادن بزرگ فلزی تا ۱۵,۰۰۰ الی بیش از ۵۰,۰۰۰ دلار در ساعت تخمین می‌زند، یک خطای پرهزینه مدیریتی است. معیار صحیح، هزینه کل مالکیت به ازای هر تن سنگ خردشده است که با اجرای چک‌لیست نگهداری زیر محقق می‌شود:

۱. پایش سرعت ارتعاشات روی پوسته یاتاقان‌ها (RMS): حفظ سطح ارتعاشات زیر ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه (مطلوب) تا ۱۸ میلی‌متر بر ثانیه (قابل قبول)؛ ورود به بازه ۱۸ تا ۲۸ میلی‌متر بر ثانیه به معنای هشدار و لزوم بررسی فوری، و عبور از ۲۸ میلی‌متر بر ثانیه به معنای توقف اضطراری سنگ‌شکن است.

۲. نقشه‌برداری ضخامت لاینرها با دستگاه التراسونیک (UT) در برابر تناژ عبوری: این پایش عددی به تیم مهندسی نشان می‌دهد که کارخانه در کدام بخش دقیقاً «محدود به سایش» است و در کدام بخش «محدود به ضربه».

۳. رعایت آستانه تعویض و چرخش فک‌ها: جابه‌جا کردن صفحات فک در میانه عمر برای یکنواخت‌سازی کارسختی و توقف پیش از کاهش ارتفاع دندانه به زیر ۹۰ درصد پروفیل اصلی یا رسیدن ضخامت صفحه به ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر برای جلوگیری از آسیب به فک اصلی سنگ‌شکن.

٤. کنترل پیش‌ازخرابی تجهیزات حفاظتی خط: اطمینان از عملکرد مگنت، فلزیاب و سرند اولیه گریزلی پیش از راه‌اندازی سنگ‌شکن با قطعات پرکروم یا کامپوزیتی.

بخش پنجم :

چارچوب حل مسئله سیستمی، منتورینگ و انتقال دانش فنی در فربد صنعت ایرانیان

تفاوت بنیادین مدل مهندسی **شرکت فربد صنعت ایرانیان** با رویکردهای سنتی بازار در آن است که ما قطعه ضدسایش را به عنوان یک محصول منزوی نمی‌سازیم، بلکه آن را بخشی از زنجیره بهره‌وری خط تولید کارفرما می‌بینیم. در این ساختار، فرآیند حل مسئله با حضور تخصصی در سایت، بررسی دانه‌بندی و درصد سیلیس خوراک و تحلیل شکست‌های قبلی آغاز می‌شود. سپس با اسکن سه‌بعدی، بازنگری هندسی مقطع، انتخاب هدفمند آلیاژ، شبیه‌سازی انجماد کالیبره‌شده (HTCP) و اجرای دقیق سیکل‌های حرارتی و ماشین‌کاری پیش می‌رود.

در گام پایانی که حلقه مفقوده پایداری در بسیاری از پروژه‌های بومی‌سازی است، مبحث **منتورینگ و کوچینگ مهندسی** به عنوان یک اصل اساسی در کنار کارشناسان نگهداری و تعمیرات و بهره‌برداری کارفرما قرار می‌گیرد: از انتقال اصول عملی رزین‌ریزی و پروتکل آچارکشی مرحله‌ای لاینرها تا آموزش نحوه وزن‌کشی جفت چکش‌ها، تفسیر نقشه‌های التراسونیک سایش و پایش ارتعاشات. افزون بر این، در پایان پروژه و در صورت درخواست مدیریت کارخانه، بسته دانش فنی مسئله با زبانی شفاف و کاربردی در اختیار تیم مهندسی کارفرما قرار می‌گیرد تا دانش حل بحران برای همیشه در سازمان باقی بماند.

مدل حل مسئله سیستمی فربد صنعت ایرانیان	رویکرد سنتی و جزیره‌ای	شاخص کلیدی فرآیند
بررسی دانه‌بندی، درصد سیلیس، رطوبت، شاخص سایش باند و ریشه‌یابی خرابی در خط	دریافت قطعه شکسته و اکتفا به آنالیز شیمیایی پایه	تحلیل اولیه و تعریف مسئله

اسکن سه‌بعدی، حذف خطاهای استهلاک و بازنگری پروفیل دنده، زاویه برخورد و فیلت‌ها	کپی‌کاری قطعه فرسوده همراه با خطاهای سایش و تمرکز تنش	مهندسی معکوس و هندسه
شبیه‌سازی ProCAST/SUTCAST با تنظیم HTCP، میکروآلیاژسازی و عملیات حرارتی دقیق	ریخته‌گری تجربی بدون شبیه‌سازی؛ ریسک تخلخل مرکزی و ترک کاربیدی	ریخته‌گری و متالورژی
منتورینگ تیم نت در نصب، بالانس G16 و پایش UT + تحویل دانش فنی کاربردی در صورت درخواست	پایان تعهد پیمانکار در لحظه ارسال قطعه از کارگاه	نصب، بهره‌برداری و دانش فنی

مراجع، استانداردها و مستندات تخصصی

1. **ASTM A128 / A128M:** Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese (Grades A, B-1 to B-4, C, E-1, E-2).
2. **ASTM A532 / A532M:** Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons (Classes I, II, and III; High-Chromium White Cast Irons).
3. **ISO 21940-11 (formerly ISO 1940-1):** Mechanical vibration — Rotor balancing — Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour (Balance Quality Grades G6.3, G16, G40).
4. **Sadjere, E. G., et al. (2017):** Application of Chvorinov's Rule and Riser Modulus Optimization for Crusher Jaw Plate Castings, Nigerian Research Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2(2), pp. 329–340.
5. **Metso Crushing and Screening Handbook (5th & 7th Editions):** Bond Abrasion Index, choke feeding, CSS, and manganese/composite liner selection guidelines.
6. **اسناد و پژوهش‌های تخصصی واحد مهندسی و تحقیق و توسعه شرکت فربد صنعت ایرانیان (آذرپرور):** کالبدشکافی چالش‌های هندسی، شبیه‌سازی انجماد (SUTCAST / ProCAST با کالیبراسیون HTCP)، میکروآلیاژسازی و عملیات حرارتی قطعات ضدسایش.
7. **Industrial Tribology & High-Chromium Cast Iron Engineering Literature:** Destabilization heat treatment, M7C3 eutectic carbide morphology, and Ha/Hm abrasive wear transitions.

شرکت مهندسی فربد صنعت ایرانیان

مرجع تخصصی حل مسئله، مهندسی معکوس و ساخت قطعات حساس صنعتی

وب‌سایت رسمی و بانک مقالات تخصصی: www.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.