مطالعه موردی مهندسی و توسعه پره‌های شات‌بالست

توسعه ماده، عملیات حرارتی و ارزیابی صنعتی پره در شرایط واقعی کار

کارخانه یاقوت صنعت – جاده جزیره اسلامی، ارومیه

آراد | مهندسی، تولید و توسعه راهکارهای مواد و قطعات تخصصی

بخش اول — مقدمه فنی: آشنایی با پره‌های شات‌بالست

این بخش، خلاصه‌ای از مقدمه فنی تهیه‌شده برای پروژه است و مبنای فنی تحلیل Case Study حاضر را تشکیل می‌دهد.

۱ .شات‌بالست و نقش پره

شات‌بالست یکی از روش‌های متداول تمیزکاری و آماده‌سازی سطح است که در آن ذرات ساینده با سرعت بالا به سطح قطعه برخورد می‌کنند. در سیستم‌هایCentrifugal Blast Wheel ، چرخ دوار انرژی لازم برای شتاب‌دادن به ذرات را فراهم می‌کند و زنجیره کلی انتقال انرژی به‌صورت موتور ⟶ چرخ ⟶ پره ⟶ شات ⟶ قطعه قابل بیان است. پره یکی از مهم‌ترین واسطه‌های انتقال انرژی مکانیکی از چرخ به ذرات ساینده است.

۲ .مسیر حرکت شات و شرایط کاری پره

شات از مرکز مجموعه وارد مسیر پره می‌شود، روی سطح پره حرکت می‌کند و در اثر دوران چرخ به سمت بیرون شتاب می‌گیرد. در این مسیر، علاوه بر انتقال انرژی، لغزش نسبی و تماس شدید میان ذرات و سطح پره ایجاد می‌شود. با افزایش شعاع، سرعت خطی نیز افزایش می‌یابد و به همین دلیل سایش در طول پره الزاماً یکنواخت نیست.

۳ .مکانیزم‌های اصلی سایش

مکانیزم‌های قابل مشاهده در پره‌های شات‌بالست شامل سایش ساینده دو جسمی، سایش سه جسمی، Microcuttingو Spalling است. نوع و وضعیت ساینده می‌تواند مکانیزم غالب را تغییر دهد و بنابراین تحلیل خرابی نباید صرفاً بر جنس پره متمرکز باشد.

۴ .اثر نوع و کیفیت ساینده

داده‌های گزارش‌شده در ASM برای یک شرایط مشخص نشان می‌دهد که تغییر نوع ساینده و آلودگی آن می‌تواند عمر پره را به‌شدت تغییر دهد؛ از حدود ۶۰۰ ساعت برای Steel Shot کم Finesتا حدود ۴–۶ ساعت برای Sand خالص. این اعداد عمومی نیستند و صرفاً مربوط به شرایط گزارش‌شده‌اند، اما اهمیت نوع، سختی، اندازه، Finesو آلودگی ساینده را نشان می‌دهند.

۵ .ماده، ریزساختار و سختی

چدن‌های سفید پرکروم و سایر چدن‌های مقاوم به سایش به دلیل قابلیت ایجاد سختی و فازهای مقاوم به سایش در این کاربرد اهمیت دارند. با این حال، سختی به‌تنهایی معیار کافی نیست؛ نوع و توزیع کاربیدها، زمینه فلزی، Austeniteباقیمانده، چقرمگی و عملیات حرارتی بر عملکرد نهایی اثر می‌گذارند.

۶ .عملیات حرارتی و ریزساختار

عملیات حرارتی بخشی از طراحی عملکرد پره است. بسته به آلیاژ و هدف، کنترل زمینه، سختی، Austenite باقیمانده، توزیع کاربیدها، تنش‌های پسماند، چقرمگی و پایداری ابعادی اهمیت دارد.

۷ .هندسه، عملکرد و عمر مفید

پره تنها یک قطعه سایشی نیست؛ هندسه آن بر مسیر حرکت شات، سرعت خروج، الگوی پاشش و یکنواختی عملکرد اثر می‌گذارد. با افزایش سایش، پروفیل پره تغییر می‌کند و در نتیجه Flow Shot و Blast Pattern نیز می‌توانند تغییر کنند. بنابراین عمر مفید لزوماً با شکست پره پایان نمی‌یابد و ممکن است با افت عملکرد آغاز شود.

۸ .ارزیابی مهندسی

ارزیابی می‌تواند شامل بررسی ظاهری، اندازه‌گیری ابعادی، سختی‌سنجی، آنالیز شیمیایی، متالوگرافی و بررسی سطح سایش باشد. عمر نیز می‌تواند بر اساس ساعات کار، جرم یا حجم ماده پردازش‌شده یا سایر معیارهای مناسب تعریف شود.

جمع‌بندی مقدمه: تحلیل مهندسی پره شات‌بالست باید هم‌زمان ماده، ریزساختار، عملیات حرارتی، سختی و چقرمگی، هندسه، نوع و وضعیت ساینده، فرآیند ساخت و شرایط واقعی کار را در نظر بگیرد.

بخش دوم — مطالعه موردی آراد

۱ .مشخصات پروژه

پارامتر مشخصات

محل پروژه کارخانه یاقوت صنعت، جاده جزیره اسلامی، ارومیه

نوع فعالیت کارخانه ساخت سازه‌های فولادی برای سوله‌ها

کاربرد شات‌بالست آماده‌سازی/تمیزکاری سطح تیرآهن‌ها و اتصالات پیش از رنگ

نوع دستگاه دستگاه شات‌بالست با ساختارWestern-type ؛ برند و مدل محرمانه

قطر چرخ/توربین ۷۵ سانتی‌متر

تعداد پره ۸ عدد

هندسه اولیه پره مستطیلی، حدود ۲۰ × ۸ سانتی‌متر

ضخامت اولیه حدود ۱۶ میلی‌متر

ساینده Steel Grit G۵۵۰

آلودگی ماسه محدود

برخی مشخصات فنی ماده و عملیات حرارتی به‌دلیل محرمانگی دانش فنی پروژه عمداً در این گزارش عمومی نشده‌اند.

۲ .مسئله اولیه

پره‌های مورد استفاده پیش از پروژه عمدتاً از چدن آلیاژی ریختگی بودند و عمر کاری آن‌ها حداکثر حدود ۳۰۰ ساعت بود. سایش سریع موجب کاهش ضخامت و در ادامه ایجاد سوراخ در پره می‌شد. سایش غیر یکنواخت نیز می‌توانست اختلاف جرم ایجاد کرده و شرایط بالانس چرخ را مختل کند.

۳ .تشخیص اولیه

بر اساس اطلاعات اولیه و شرایط کاری، مسئله اصلی ناتوانی پره‌های قبلی در تحمل شرایط شدید سایشی تشخیص داده شد. مکانیزم‌های اصلی شناسایی‌شده شامل سایش ساینده، گالینگ و در برخی موارد سایش خستگی بودند.

۴ .فرضیه مهندسی پروژه

فرض اصلی پروژه این بود که افزایش عمر پره صرفاً با افزایش سختی حاصل نمی‌شود و باید ماده، ریزساختار و عملیات حرارتی به‌صورت یک سیستم مهندسی‌شده بررسی شوند.

۵ .طراحی برنامه توسعه

در مجموع سه ماده ریختگی بررسی شد: یک چدن مالیبل و دو چدن سفید با ترکیب‌های شیمیایی متفاوت. برای این مواد در مجموع ۱۲ سیکل مختلف عملیات حرارتی طراحی و اجرا شد. هدف، ایجاد و مقایسه ریزساختارهایی شامل پرلیت + کاربید، مارتنزیت + کاربید و فریت + کاربید بود. سختی نهایی نمونه‌های توسعه‌یافته در بازه ۵۸ تا ۶۵ HRC قرار گرفت.

۶ .ساخت نمونه و آزمون صنعتی

از هر سیکل عملیات حرارتی، ۸ نمونه تولید و روی دستگاه‌های صنعتی نصب و پایش شدند. پایش پروژه طی حدود ۹ ماه انجام شد تا عملکرد نمونه‌ها در شرایط واقعی کار مقایسه شود.

۷ .روش اندازه‌گیری کاهش وزن

وزن پره‌ها پیش از نصب ثبت شد. سپس در فواصل ۱۰ روزه، پره‌ها خارج، با برس سیمی تمیز و با ترازوی دقیق وزن شدند و مجدداً نصب شدند. کاهش وزن یکی از شاخص‌های اصلی مقایسه عملکرد بود.

۸ .معیارهای انتخاب

علاوه بر کاهش وزن، مقاومت در برابر ایجاد سوراخ، به‌ویژه در ناحیه میانی تا انتهایی پره، و حفظ شکل و پروفیل کاری مورد توجه قرار گرفت.

۹ .نتیجه مرحله اول

از میان ۱۲ سیکل بررسی‌شده، ۴ سیکل بهترین پاسخ را نشان دادند. هر چهار سیکل منتخب مربوط به چدن سفید بودند. بنابراین چدن‌های سفید برای ادامه توسعه گزینه‌های مطلوب‌تری نشان دادند.

۱۰ .مرحله دوم؛ بهینه‌سازی نهایی

بر اساس نتایج مرحله اول، سه سری جدید از پره‌ها طراحی و تولید شدند. این سه سری از جنبه‌های مختلف با یکدیگر تفاوت داشتند و هدف، رسیدن به گزینه نهایی بهینه برای شرایط واقعی کار بود. جزئیات دقیق تفاوت‌ها به‌دلیل محرمانگی دانش فنی منتشر نمی‌شود.

۱۱ .انتخاب راهکار نهایی

پس از پایش سری‌های مرحله دوم، گزینه نهایی انتخاب شد. سپس ۲۴ پره نهایی تولید و روی سه دستگاه/توربین نصب شدند.

۱۲ .نتیجه نهایی پروژه

عمر پره‌های توسعه‌یافته در شرایط کاری پروژه به حدود ۱۶۰۰ ساعت رسید، در حالی که عمر پره‌های قبلی حداکثر حدود ۳۰۰ ساعت بود. این نتیجه حاصل یک مسیر توسعه شامل انتخاب ماده، طراحی عملیات حرارتی، کنترل ریزساختار، ساخت نمونه، پایش کمی و اعتبارسنجی واقعی بود.

۱۳ .تعریف پایان عمر مفید

پره نهایی با شکست ناگهانی یا ایجاد سوراخ از سرویس خارج نشد. پایان عمر مفید زمانی در نظر گرفته شد که کاهش ضخامت و تغییر پروفیل کاری باعث افت عملکرد شد و ادامه کار از نظر عملکردی توجیه نداشت.

۱۴ .جمع‌بندی مهندسی

این پروژه نشان داد که توسعه پره شات‌بالست یک مسئله صرفاً انتخاب جنس نیست. عملکرد نهایی تابع برهم‌کنش ماده، ریزساختار، عملیات حرارتی، سختی و چقرمگی، هندسه، شرایط ساینده و شرایط واقعی کار است.

۱۵ .محدودیت انتشار اطلاعات

برای حفاظت از دانش فنی پروژه، ترکیب شیمیایی دقیق مواد، جزئیات کامل سیکل‌های عملیات حرارتی، پارامترهای دقیق ساخت و برخی داده‌های خام آزمایش در این نسخه منتشر نشده‌اند. روش توسعه، منطق انتخاب، شاخص‌های ارزیابی و نتیجه صنعتی پروژه ارائه شده است.

مسئله ← بررسی ← طراحی مواد و عملیات حرارتی ← ساخت نمونه ← آزمون صنعتی ← اندازه‌گیری ← انتخاب ← اعتبارسنجی نهایی ← راهکار مهندسی قابل اجرا

۱۶ .منابع فنی مقدمه

- ASM Handbook – Volume ۵, Surface Engineering — Abrasive Blast Cleaning / Centrifugal Blast Wheel
- Guidelines for Centrifugal Blast Cleaning
- Journal of Mechanical Working Technology (۱۹۸۴) – مطالعات رفتار سایشVane/Wheel
- Wear, Vol. ۱۳۵ (۱۹۹۰) – Prolonging the service life of shot-blaster blades made from high chromium cast iron
- Key Engineering Materials (۲۰۱۴) – The Wear Evaluation of Blasting Machine's Blades
- Applied Mechanics and Materials (۲۰۱۳) – The Wear Behavior of Shots Impeller Pair in Shot Blast Cleaning
- Surface and Coatings Technology (۲۰۱۹) – مطالعات طراحی پره با DEM و اثر هندسه بر CoverageوUniformity
- Shot Peener – منابع فنی مرتبط با Two-body وThree-body wear