

شرح حادثه خرابی (Failure Incident Report): شکست ناگهانی و قفل شدن شفت اصلی یک گیربکس صنعتی سنگین (قدرت ۴۰۰ کیلووات) در خط تولید فولاد پس از ۴۵۰ ساعت کارکرد (عمر طراحی شده: ۵۰'۰۰۰ ساعت). این خرابی منجر به توقف کامل خط تولید، خردشدگی دندانهای چرخ‌دنده درگیر و آسیب شدید به پوسته گیربکس شده است.

۱. نمودار استخوان ماهی / ایشیکاوا (Ishikawa Diagram)

مواد اولیه (Material)

- وجود ناخالصی‌های میکروسکوپی (Inclusions) یا عدم خلوص متالورژیکی در فولاد آلیاژی شفت (CrMo442).
- سختی نامناسب سطح شفت به دلیل فرآیند عملیات حرارتی غیراستاندارد (پایین‌تر از ۳۸ تا ۴۲ HRC).
- استفاده از روانکار (روغن دنده) با ویسکوزیته نامناسب یا دارای آلودگی ذرات فلزی.

روش اجرا (Method)

- عدم رعایت تolerانس‌های همراستاسازی (Alignment) هنگام نصب گیربکس روی شاسی.
- حذف مرحله تنش‌زدایی (Relief Stress R) پس از فرآیند ماشین‌کاری و تراشکاری شفت.
- تدوین غیراستاندارد برنامه روانکاری و عدم رعایت فواصل زمانی تعویض فیلتر روغن.

ماشین‌آلات و تجهیزات (Machine)

- وجود لنگی (Runout) در محور اسپیندل دستگاه تراش CNC هنگام ماشین‌کاری اولیه شفت.
- کالیبره نبودن دستگاه (ordinate Measuring Machine (CMM-oC در خط تولید شفت.
- فرسودگی و لقی غیرمجاز بلبرینگ‌های تکیه‌گاهی شفت در گیربکس.

نیروی انسانی (Man)

- عدم دقت اپراتور مونتاژ در انطباق خار و خارگاه (Keyway) و وارد کردن ضربه چکشی حین مونتاژ.
- عدم شناسایی ترک‌های سطحی توسط بازرس کنترل کیفیت (QC) در مرحله تست غیرتخریبی (NDT).
- عدم توجه تکنسین نگهداری و تعمیرات (نت) به افزایش تراز ارتعاشات در آنالیزهای دوره‌ای.

اندازه‌گیری (Measurement)

- خطای سنسورهای پایش وضعیت (Vibration Sensors) به دلیل نصب در محل نامناسب روی پوسته.
- عدم سنجش دقیق صافی سطح (R_a - Surface Roughness) در شعاع انحنای (Fillet) شیار خار.

محیط (Environment)

- نوسانات شدید دمایی محیط کارخانه (بین 10°C تا 45°C) و ایجاد تنش‌های حرارتی.
- گرد و غبار شدید ذرات اکسید آهن در محیط و نفوذ آن به داخل کاسه‌نمدهای گیربکس.

۲. تحلیل به روش ۵ چرا (Why Analysis-5)

- چرا ۱: چرا شفت اصلی گیربکس دچار شکست ناگهانی و قفل‌شدگی شد؟
 - پاسخ: ترک خستگی (Fatigue Failure) از محل شیار خار (Keyway) آغاز شده و تا قطع کامل مقطع شفت پیشروی کرده است.
- چرا ۲: چرا ترک خستگی در محل شیار خار آغاز شد؟
 - پاسخ: تمرکز تنش (Stress Concentration) در شعاع انحنای داخلی شیار خار، بسیار بالاتر از حد تحمل خستگی ماده بوده است.
- چرا ۳: چرا تمرکز تنش در آن نقطه تا این حد بالا بود؟

- پاسخ: شعاع انحنای کنج شیار خار (R) به جای مقدار استاندارد 1mm ، به میزان 0.4mm (تیز و بدون انحنای کافی) ماشین کاری شده بود.
- چرا ۴: چرا شعاع انحنای شیار خار کمتر از حد استاندارد نقشه ماشین کاری شد؟
- پاسخ: اینسرت (تیغچه) فرز CNC دچار سائیدگی شدید شده بود و اپراتور بدون تعویض ابزار، قطعه کاری را ادامه داد.
- چرا ۵ (ریشه اصلی خرابی): چرا اپراتور ابزار فرسوده را تعویض نکرد و بازرسی ابعادی انجام نشد؟
- پاسخ: دستورالعمل (SOP) کنترل عمر ابزار وجود نداشت و چکلیست بازرسی ابعادی کیفیت (QC Gate)، اندازه شعاع انحنای کنجها (Fillet Radii) را به عنوان یک پارامتر بحرانی (Critical Parameter) کنترل نمی کرد.

۳. ریشه اصلی خرابی (Most Likely Root Cause)

علت ریشه ای: نقص در فرآیند کنترل کیفیت و ساخت (Method/Machine)؛ عدم وجود دستورالعمل تعویض به موقع ابزار فرزکاری و نقص در چکلیست بازرسی QC که منجر به ایجاد شعاع کنج غیر استاندارد ($R = 0.4\text{mm}$) در شیار خار، تمرکز تنش شدید و در نهایت شکست خستگی زودرس شفت شده است.

۴. مدارک و شواهد مورد نیاز جهت تایید (Supporting Evidence)

- متالوگرافی و شکستنگاری (Fractography با میکروسکوپ SEM): بررسی سطح شکست جهت تایید علامت های خطوط ساحلی (Beach Marks) و شناسایی دقیق نقطه شروع ترک (Initiation Site) در کنج شیار خار.
- اندازه گیری ابعادی با دستگاه CMM یا پروفیلومتر: اندازه گیری دقیق شعاع کنج شیار خار در قطعه شکسته شده و مقایسه آن با نقشه مهندسی.
- تست سختی سنجی و آنالیز کوانتومتری: تایید ترکیب شیمیایی آلیاژ CrMo442 و بررسی عمق و میزان سختی حاصل از عملیات حرارتی جهت اطمینان از صحت متریال اولیه.

۵. اقدامات اصلاحی (Corrective Actions)

۱. تغییر طراحی و اصلاح ابزار ماشین کاری (Yoke-Engineering Controls / Poka)

- اقدام: تجدیدنظر در نقشه شفت و افزایش شعاع انحنای کنجها، همچنین بهره گیری از تیغچه های استاندارد با شعاع مشخص و پیاده سازی سیستم قفل خودکار CNC در صورت انقضای طول عمر ابزار.
- میزان اثربخشی: عالی (حذف کامل احتمال خطای ابزار و کاهش تمرکز تنش)

۲. اصلاح چکلیست بازرسی QC و الزام تست CMM (Quality Assurance Control)

- اقدام: افزودن اندازه شعاع انحنای کنجها (Fillet Radii) به عنوان پارامتر بحرانی (CTQ) در شیت بازرسی کیفیت و الزام تست نوری/CMM برای ۱۰۰٪ قطعات شفت قبل از عملیات حرارتی.
- میزان اثربخشی: متوسط به بالا (جلوگیری از خروج قطعه معیوب از خط تولید)

۳. تدوین SOP تعویض ابزار و آموزش اپراتورها (Administrative Controls / Training)

- اقدام: تدوین دستورالعمل استاندارد (SOP) برای تعیین حداکثر قطعات قابل ماشین کاری با هر تیغچه و برگزاری دوره آموزشی برای اپراتورهای CNC و بازرسان کیفیت.
- میزان اثربخشی: متوسط (متکی بر رفتار و دقت نیروی انسانی)