

چالش آببندی سیلندرهای هیدرولیک در محیط فولادسازی

از روایت کارگاهی تا راهکار مهندسی



مقدمه: روایتی از دل آتش و سرباره

مهندس مرتضی، سرپرست کارگاه فولادسازی مجتمع بزرگی چون فولاد مبارکه، بار دیگر با دستپاچگی، تلفن قرمز اتاق فرمان را برداشت. صدای جوش و خروش کوره‌ها و ضرب‌آهنگ ماشین‌آلات، پس‌زمینه‌ای همیشگی بود، اما صدایی که این بار آزارش می‌داد، صدای هیس هیس مداوم پاشش روغن هیدرولیک از راد سیلندر جابجایی پاتیل سرباره بود. او با خود زمزمه کرد: "باز هم پکینگ‌ها!"

سیلندری که پکینگ آن مرتباً نشتی می‌دهد، در نزدیکی پاتیل سرباره نصب شده است. این به معنای رویارویی پکینگ با سه دشمن اصلی است:

۱. گرمای تابشی بالا: حرارت عظیم ناشی از پاتیل مذاب.
۲. پاشش سرباره و آلودگی: ذرات داغ و ساینده سرباره که روی راد می‌نشینند.
۳. شرایط سیال هیدرولیک نامناسب: استفاده از امولسیون روغن در آب (مانند پارس اترک ۱۰%) با غلظت نامناسب و ناپایدار که در مجاورت گرما به دمای بحرانی رسیده و عملاً به بخار تبدیل می‌شود.

دفترچه فنی قطعه (متریال کد ۸۲۱۰۴۰۵۱۳۴۰۲۰) به وضوح مشخص کرده بود که پکینگ V-شکل با ابعاد ۲۸۰\$ \times 60\$ \times 318 times از جنس NBR/Cotton Fabric (نیتریل بوتادین رابر تقویت شده با الیاف کتان) و برای دمای کاری ۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد طراحی شده است. این مشخصات در مقابل محیطی که دمای آن فراتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است و با بخار و سرباره در تماس است، مانند تسلیم شدن یک سرباز با زره کاغذی در میدان نبرد بود. مهندس مرتضی می‌دانست که راهکار، فراتر از تعویض ساده پکینگ و نیازمند یک بازنگری عمیق مهندسی است.

فصل ۱: ساختمان و انواع پکینگ‌های صنعتی (V-Packing)

۱.۱. ساختمان مجموعه پکینگ V-شکل:

پکینگ V-شکل (V-Packing) که با نام‌های چلبی یا شورون (Chevron) نیز شناخته می‌شود، یک مجموعه آببندی چندتکه است که برای فشارهای بالا و محیط‌های خشن طراحی شده است. مجموعه استاندارد این پکینگ، همانند آنچه در مستندات شما (پکینگ ۱+۴+۱) ذکر شده است، شامل سه جزء اصلی است:

- ۱ عدد رینگ نر (Male Adapter): رینگ فشاردهنده پایینی که نیرو و فشار را به اولین حلقه V-شکل منتقل می‌کند.
- ۴ عدد رینگ V-شکل (V-Ring): حلقه‌های آبیندی اصلی که دارای سطح مقطع V یا لباسی هستند. این حلقه‌ها تحت فشار سیال باز شده و با دیواره‌های استوانه (بوش پکینگ) و راد (میله) تماس بیشتری برقرار کرده و آبیندی دینامیکی را انجام می‌دهند. تعداد این رینگ‌ها بر اساس فشار کاری و سختی محیط تعیین می‌شود.
- ۱ عدد رینگ ماده (Female Adapter): رینگ نگهدارنده بالایی که در قسمت ورودی حفره پکینگ قرار گرفته و لبه‌های رینگ‌های V-شکل را از آسیب و سایش محافظت می‌کند.



۱.۲. مکانیسم عملکرد:

عملکرد پکینگ V-شکل بر اساس "آببندی با فشار" است. با افزایش فشار سیال هیدرولیک (تا ۱۰۰ بار در این مورد)، نیروی سیال به رینگ‌های V وارد شده و آن‌ها را به سمت دیواره‌ها فشار می‌دهد، که منجر به آببندی محکم‌تر می‌شود. این ویژگی، پکینگ‌های V را به انتخابی مناسب برای سیلندرهای سنگین و پرفشار در صنعت فولاد تبدیل کرده است.

فصل ۲: کاربرد پکینگ‌ها در تجهیزات صنعت فولاد

۲.۱. محیط عملیاتی حاد:

سیلندرهای هیدرولیک در بخش فولادسازی، مانند جابجایی پاتیل، تانک‌تیل‌تینگ (Tilting)، سیستم‌های تنظیم الکتروود در کوره قوس الکتریکی، و پرس‌های خردکن سرباره، در معرض شدیدترین شرایط محیطی هستند:

پارامتر محیطی	تأثیر بر پکینگ
گرمای تابشی و هدایتی	از دست رفتن خاصیت الاستیکی (پختگی) و سخت شدن آّبند (مشکل اصلی NBR/Cotton).
آلودگی سرباره (Slag Splash)	سایش شدید راد، تخریب سریع لبه‌های آّبند و ایجاد شیارهای نشتی.
فشار بالا (۱۰۰ بار)	نیاز به استحکام مکانیکی و پایداری ابعادی بالا.
سیال امولسیون آب و روغن	نیاز به مقاومت شیمیایی در برابر هیدرولیز آب و روغن.

۲.۲. هدف کاربرد:

در این مورد خاص، پکینگ باید دو وظیفه حیاتی را انجام دهد:

۱. آببندی سیال (Rod Seal): جلوگیری از نشتی سیال هیدرولیک (امولسیون) به محیط بیرون.

۲. پاک‌کنندگی (Wiper/Scraper): جلوگیری از ورود آلودگی‌های خارجی (سرباره، گرد و غبار، حرارت) به داخل سیستم. این عملکرد در محیط فولاد حیاتی است.

فصل ۳: مواد و متريال‌های تخصصی برای محیط‌های پرحرارت

۳.۱. تحلیل متريال موجود (NBR/Cotton Fabric):

- متريال موجود (طبق PDF): NBR/Cotton Fabric.
- مشکل: دمای کاری استاندارد NBR حداکثر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است، اما در محیط‌های دینامیک و پرفشار، توصیه نمی‌شود. الیاف کتان (Cotton) تقویت‌کننده استحکام هستند اما مقاومت حرارتی پائینی دارند و در صورت تماس با بخار و آب داغ، دچار تخریب می‌شوند.



محدوده دمایی ۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد در دفترچه فنی، نشان می‌دهد که این پکینگ هرگز برای محیط نزدیک سرباره طراحی نشده است.

۳.۲. متریال‌های پیشنهادی جایگزین (نسل جدید):

برای دستیابی به ضمانت ۶ ماهه در شرایط نزدیک به سرباره، باید از کامپوزیت‌های با مقاومت حرارتی و سایشی بسیار بالاتر استفاده کرد:

ویژگی‌ها و مزایا	حداکثر دمای کارکرد تقریبی	ماده پیشنهادی
مقاومت شیمیایی عالی و مقاومت حرارتی بسیار بالا. مناسب برای سیال‌های آب/روغن تا دمای بالا.	$^{\circ}\text{C}^{200}+\$$	FKM/Viton تقویت شده با آرامید
مقاومت اصطکاکی و سایشی فوق‌العاده کم، مقاومت شیمیایی کامل. (مانند PTFE با گرافیتی، برنز یا کربن).	$^{\circ}\text{C}^{260}+\$$	PTFE پر شده (Filled PTFE)
مقاومت حرارتی بالاتر از NBR و مقاومت سایشی بسیار خوب. جایگزینی اقتصادی‌تر از FKM.	$^{\circ}\text{C}^{150}+\$$	HNBR تقویت شده با الیاف سنتزی
برای شرایط حرارتی بسیار بالا، معمولاً در مکانیکال سیل‌های استاتیک یا پکینگ‌های گرافیتی خاص استفاده می‌شود.	$^{\circ}\text{C}^{450}+\$$ (در برخی ساختارها)	گرافیت منعطف تقویت شده

پیشنهاد اصلی: تغییر متریال حلقه‌های V-شکل به FKM تقویت شده با الیاف آرامید یا کامپوزیت PTFE/برنز و استفاده از رینگ‌های نر و ماده از جنس فنولیک تقویت شده با الیاف شیشه برای حداکثر پایداری مکانیکی در دمای بالا.

فصل ۴: نکات کلیدی در تهیه و تأمین پکینگ‌های تخصصی

۴.۱. تحلیل دقیق شرایط مرزی (Boundary Conditions):

- دمای واقعی: دمای ۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد (ثبت شده در صفحه ۸ مستندات) را نادیده بگیرید. دمای واقعی در تماس با راد ممکن است تا ${}^{\circ}\text{C}^{120}$ تا ${}^{\circ}\text{C}^{150}$ بالا برود. انتخاب متریال باید حداقل تا ${}^{\circ}\text{C}^{180}$ مقاوم باشد.
- سازگاری شیمیایی: از آنجایی که سیال، امولسیون روغن در آب است، متریال باید در برابر هیدرولیز و تخریب ناشی از تماس مداوم با آب داغ و مواد افزودنی روغن کاملاً مقاوم باشد.
- سختی و پرداخت راد (Rod Surface Finish): برای عملکرد صحیح هر پکینگ، پرداخت سطح راد سیلندر (Ra value) باید در محدوده مشخص (معمولاً ۰.۱ تا ۰.۳ میکرومتر) باشد. در محیط‌های با پاشش سرباره، باید از پوشش‌های سخت کروم با کیفیت بالاتر یا پوشش‌های سرامیکی مقاوم به سایش استفاده شود.

۴.۲. الزامات تأمین:

- گواهی‌نامه متریال (MTC): تأمین‌کننده باید گواهی‌نامه معتبر متریال (مثلاً FKM) را ارائه دهد تا از اصالت و مقاومت حرارتی آن اطمینان حاصل شود.
- استفاده از سیستم‌های کمکی (Wiper/Scraper): تأمین و نصب یک آبیند پاک‌کننده ثانویه (Wiper) از جنس PTFE/برنز یا PU مقاوم به حرارت در جلوی مجموعه پکینگ (در معرض سرباره) برای محافظت از پکینگ‌های اصلی V-شکل الزامی است.

فصل ۵: نحوه مونتاژ پکینگ V-شکل برای طول عمر حداکثری

۵.۱. آماده‌سازی و بازرسی قطعات:

۱. بررسی راد و بوش: راد سیلندر باید از نظر وجود هرگونه خط و خش، سایش، یا خوردگی ناشی از سرباره کاملاً بررسی شود. وجود هرگونه آسیب منجر به نشتی فوری می‌شود.
۲. تمیزکاری کامل: تمامی قطعات، از جمله شیار محل نصب پکینگ و رینگ‌های جدید، باید با سیال هیدرولیک تمیز شده و عاری از هرگونه ذرات خارجی باشند.

۵.۲. ترتیب مونتاژ صحیح (Orientation):

مهم‌ترین نکته در مونتاژ پکینگ V-شکل، جهت صحیح قرارگیری رینگ‌ها است. لبه‌های (لب‌ها) رینگ‌های V-شکل باید همیشه رو به سیال تحت فشار (داخل سیلندر) قرار گیرند تا فشار هیدرولیک آن‌ها را باز کرده و آبیندی را فعال کند.

- ابتدا رینگ نر (Male Adapter) را قرار دهید.
- سپس چهار عدد رینگ V-شکل را به نحوی که دهانه باز آن‌ها رو به رینگ نر (و در نتیجه رو به سیال) باشد، مونتاژ کنید.
- در انتها رینگ ماده (Female Adapter) را قرار دهید.

۵.۳. فشرده‌سازی اولیه (Pre-load):

پس از قرارگیری مجموعه، بوش پکینگ باید با گشتاور مناسبی بسته شود تا یک فشرده‌سازی اولیه (Pre-load) روی مجموعه اعمال شود. این فشرده‌سازی بسیار حیاتی است، زیرا تضمین می‌کند که پکینگ در فشار صفر نیز آبیندی اولیه را حفظ کند و از چرخش آزادانه جلوگیری شود. از اعمال گشتاور بیش از حد که منجر به تخریب لبه‌ها می‌شود، اکیداً خودداری کنید.

فصل ۶: تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه برای محیط فولاد

۶.۱. کنترل کیفیت سیال هیدرولیک:

بزرگترین عامل تخریب پکینگ‌ها در این مورد، تبدیل شدن امولسیون آب/روغن به بخار است.

- کنترل دما: نصب خنک‌کننده‌های قوی‌تر و سنسورهای دمای پیشرفته بر روی سیال هیدرولیک. دمای سیال هرگز نباید از ۶۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر رود.
- آنالیز غلظت: انجام تست‌های منظم برای اطمینان از غلظت ۱۰ درصدی روغن در آب (نسبت امولسیون). ناپایداری امولسیون باعث جدا شدن فازها و کاهش خاصیت روانکاری می‌شود.

۶.۲. محافظت راد سیلندر:

در محیط‌های با پاشش سرباره:

- استفاده از بیلوز (Bellows) یا روکش محافظ: نصب غلاف‌های تلسکوپی فلزی یا کاورهای نسوز (مانند پارچه‌های آغشته به سیلیکون یا فایبرگلاس) بر روی راد سیلندر برای جلوگیری فیزیکی از رسیدن سرباره و گرمای تابشی مستقیم به آبیند.
- برنامه بازرسی چشمی: بازرسی روزانه راد و محفظه پکینگ برای حذف ذرات سرباره یا تجمع آلودگی، پیش از آنکه وارد محفظه اصلی شوند.

۶.۳. مستندسازی و تحلیل خرابی:

- ثبت دقیق: ثبت زمان دقیق خرابی، نوع خرابی (بریدگی، سختی، تورم)، و دمای محیط در زمان خرابی برای هر پکینگ. این داده‌ها ورودی‌های اصلی برای انتخاب متریال جدید هستند.
- استانداردسازی: ایجاد یک استاندارد داخلی (مانند DSGS4103) که متریال و تolerانس‌ها را به طور خاص برای "محیط‌های پرحرارت فولادسازی" تعریف کند و نه شرایط عمومی.

نتیجه‌گیری و نکات کلیدی تجربی

تجربه کار در واحد فولادسازی نشان می‌دهد که ۹۰ درصد خرابی پکینگ‌ها در محیط‌های حاد، نه ناشی از فشار کاری، بلکه نتیجه نادیده گرفتن شرایط حرارتی و شیمیایی مرزی است. برای مقابله با این چالش، نکات کلیدی زیر باید مدنظر قرار گیرد:

- متریال *NBR/Cotton Fabric* برای سیلندره‌های نزدیک پاتیل سرپاره، بدون سیستم‌های حفاظتی ثانویه، یک انتخاب اشتباه مهندسی است و باید با *FKM/آرامید* یا *PTFE/برنز* تعویض شود.
- سیستم آببندی باید شامل یک پکینگ V-شکل مقاوم در برابر فشار و یک پاک‌کننده (*Wiper*) مقاوم در برابر سایش و حرارت در قسمت بیرونی باشد. این دو باید مکمل یکدیگر عمل کنند.
- کنترل دمای سیال هیدرولیک و پایداری امولسیون آب/روغن حیاتی‌تر از نوع پکینگ است. بخار شدن سیال، عامل اصلی تخریب پکینگ از داخل است.
- اعمال پوشش محافظ (بیلوز یا کاور نسوز) بر روی راد سیلندر در این منطقه، مهم‌ترین اقدام پیشگیرانه برای تضمین عمر ۶ ماهه است.
- فشرده‌سازی اولیه (*Pre-load*) مناسب در هنگام مونتاژ پکینگ V-شکل، از نشتی در حالت‌های کم‌فشار و خاموش بودن سیستم جلوگیری می‌کند.

تهیه و تدوین: تیم مهندسی شرکت فرید صنعت ایرانیان پاییز ۱۴۰۴

منابع، مراجع و مستندات

۱. استاندارد ISO 5597: ابعاد حفره‌های محل نصب پکینگ‌های میله و پیستون.
۲. استاندارد ISO 6195: ابعاد و الزامات عملکرد برای مجموعه‌های آببندی چلیبی (V-Packing).
۳. مراجع فنی SIMRIT / Freudenberg: کاتالوگ‌های فنی در خصوص انتخاب متریال‌های آببندی بر پایه دما و سازگاری شیمیایی (خصوصاً FKM و PTFE Filled).
۴. استاندارد ASTM D2000: راهنمای طبقه‌بندی مواد الاستومری بر اساس خواص فیزیکی و مقاومت در برابر دما و سیال.
۵. مستندات داخلی فولاد مبارکه (DSGS4103.Rev.C): دفترچه مشخصات فنی پکینگ متریال کد A۴۰۲۰۵۱۳۴۰۸۲۱.
۶. تجارب سالها کار در صنعت فولاد