مهندسی معکوس در بومی‌سازی پروانه پمپ‌های وارمن (Warman)

کالبدشکافی چالش‌های هندسی

شبیه‌سازی انجماد، میکروآلیاژسازی و عملیات حرارتی در ساخت قطعات ضدسایش

تهیه و تدوین: آرزو آذرپرور
واحد مهندسی فروش ، تحقیق و توسعه شرکت فربد صنعت ایرانیان

پرسش کلیدی و چالش بنیادین صنعت

چرا با وجود ادعای استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پیشرفته ریخته‌گری، پروانه‌های پمپ‌های وارمن (Warman) پس از مدت کوتاهی کارکرد در سایت دچار کاویتاسیون، ترک‌خوردگی ریشه پره و افت شدید راندمان می‌شوند؟ و چرا خروجی کارگاه‌های سنتی با استانداردهای کارخانه‌ای سازندگان اصلی فرسنگ‌ها فاصله دارد؟

در صنایع سنگین و مادر همچون فولاد، پتروشیمی، مس و معدن، پمپ‌های سانتریفیوژ به منزله قلب جریانی خطوط تولید عمل می‌کنند. در این میان، برند وارمن (Warman) در حوزه پمپ‌های انتقال اسلاری و مواد ساینده، به عنوان استاندارد جهانی این صنعت شناخته می‌شود.

با این حال، چالش بزرگ بسیاری از شرکت‌های ایرانی زمانی آغاز می‌شود که این پروانه‌ها پس از طی دوره کارکرد دچار استهلاک شده و با توجه به تحریم‌ها، نیاز به ساخت یا مهندسی معکوس پیدا می‌کنند. حدود بیست سال است که تأمین قطعات مصرفی پمپ‌های صنعتی و تکنولوژیک در صنایع مختلف از کمپانی‌های معتبر دنیا با مشکل مواجه شده است؛ به‌ویژه پمپ‌های اسلاری که به علت پمپاژ محلول‌های حاوی مواد ساینده، عمر قطعات آن‌ها کوتاه‌تر است و نیاز بیشتری به قطعات یدکی (Spare Parts) دارند.

از میان تمامی این قطعات، ساخت پروانه پمپ به مراتب تکنیکال‌تر و دشوارتر است. از این رو، در این مقاله تلاش کرده‌ایم نکات کاربردی و متالورژیکی مؤثر در روند ساخت پروانه به روش مهندسی معکوس را که نقشی تعیین‌کننده در عمر کاربری قطعه دارند، مرور کنیم.



تصویر شماره ۱: نمونه واقعی پروانه ریخته‌گری‌شده پمپ اسلاری وارمن (Warman) پیش از انجام فرآیندهای ماشین‌کاری تکمیلی و کنترل ابعادی

بخش اول | تحلیل عملکردی و هندسی

۱. نقاشی و کپی‌کاری سطحی یا مهندسی معکوس واقعی؟

متأسفانه در ایران بسیاری از کارگاه‌ها به صورت جزیره‌ای به مقوله مهندسی معکوس نگاه می‌کنند. برای مثال، هنگامی که کارفرما ساخت این پروانه را به یک کارگاه ریخته‌گری می‌سپارد، مهندسی معکوس از نظر آن‌ها صرفاً به استخراج یک نقشه برای ساخت مدل و یک آنالیز برای تهیه ذوب محدود می‌شود؛ در حالی که تهیه نقشه دقیق و اصولی از پروانه، دست‌کم به اندازه آنالیز شیمیایی یا عملیات حرارتی مربوطه در عمر کاربردی پروانه مؤثر است.

این درک کامل از کاربرد پمپ، نقش هیدرولیکی پروانه و زوایای دقیق پره‌هاست که ما را به نقشه‌ای کاملاً منطبق با پروانه طراحی‌شده کارخانه اصلی می‌رساند. در مهندسی معکوس، قطعه باید در کنار سایر قطعات درگیر به خوبی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد؛ زیرا از مونتاژ قطعات، مکانیزم‌ها شکل می‌گیرند و از کنار هم قرار دادن مکانیزم‌های گوناگون، تجهیزات خاص پدید خواهند آمد.

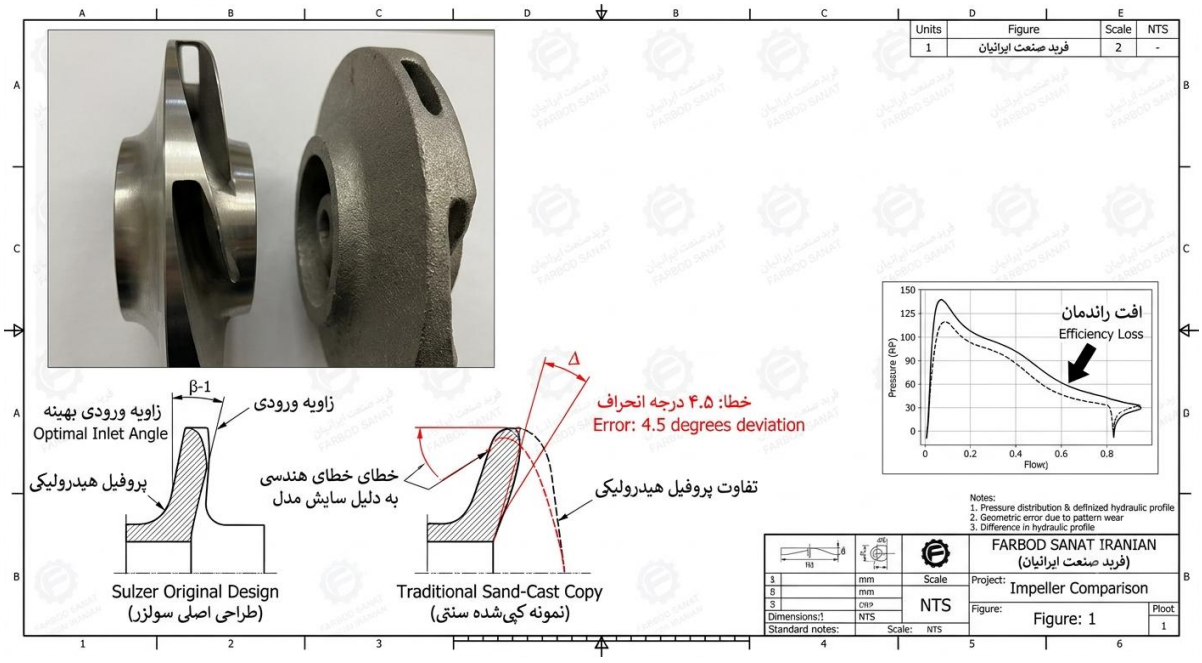
بنابراین، انجام مهندسی معکوس نیازمند یک تیم مهندسی چندتخصصی است. ما در شرکت مهندسی فربد صنعت ایرانیان همواره تلاش کرده‌ایم نیاز مشتری را فراتر از خواسته اولیه او درک کنیم و این مهم را با تکیه بر تیم مهندسی و رویکرد حل مسئله به انجام برسانیم. در این مسیر، توجه به سه گام اساسی زیر ضروری است:

- ۱-۱) تحلیل عملکردی و درک تعامل اجزا: درک صحیح ارتباط قطعه اصلی با قطعات مجاور و مستندسازی دقیق عملکرد با کوچک‌ترین جزئیات.

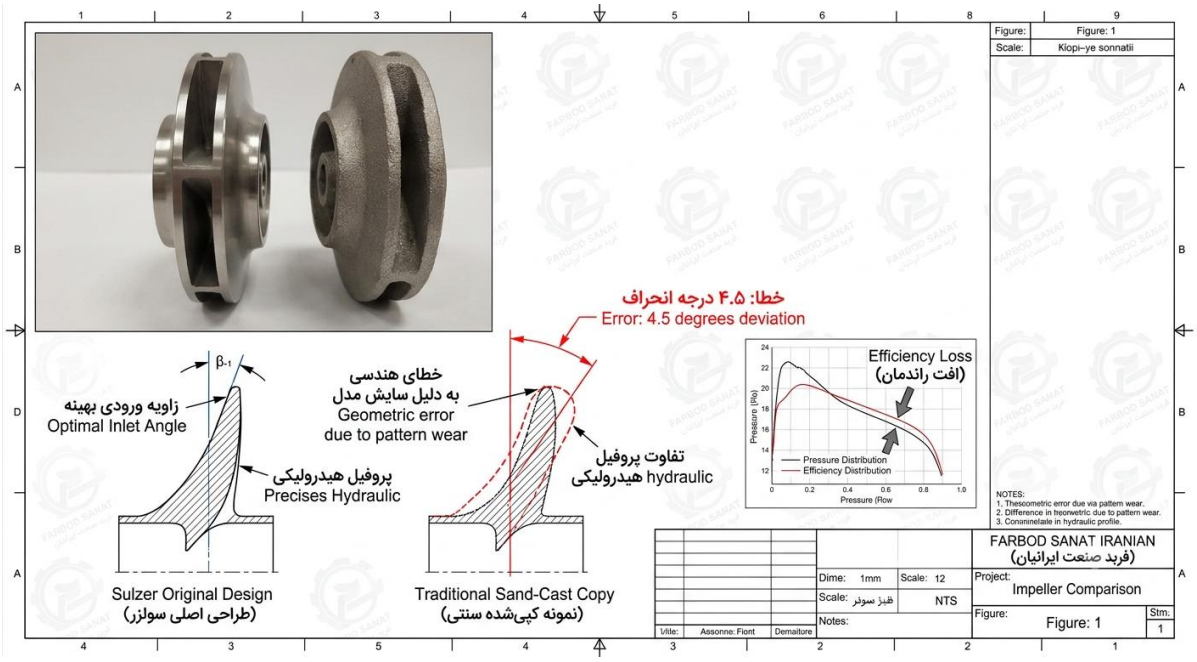
- ۱-۲) مستندسازی هندسی و حذف خطاهای سایش: اسکن سه‌بعدی و کروکی‌برداری دقیق قطعه با هدف حذف خطاهای احتمالی ناشی از استهلاک که صحت آن در این گام توسط نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مورد اجرا و راستی‌آزمایی قرار می‌گیرد.

- ۱-۳) مهندسی معکوس دقیق متالورژیکی و آنالیز اولیه: شناسایی مشخصات متالورژیکی نمونه کمپانی سازنده اصلی از طریق تست‌ها و آزمایش‌هایی همچون XRF، کوانتومتری، سختی‌سنجی، ضخامت‌سنجی نوع پوشش و متالوگرافی.

در تصاویر شماره ۲ و ۳، مقایسه فنی دو نمونه پروانه و تأثیر مستقیم هندسه و زاویه پره‌ها بر راندمان پمپ نمایش داده شده است:



تصویر شماره ۲: مقایسه پروفیل هیدرولیکی و زاویه ورودی بهینه پره در طراحی اصلی با نمونه کپی‌شده سنتی (انحراف ۴.۵ درجه‌ای ناشی از سایش مدل و افت شدید منحنی فشار–دبی)



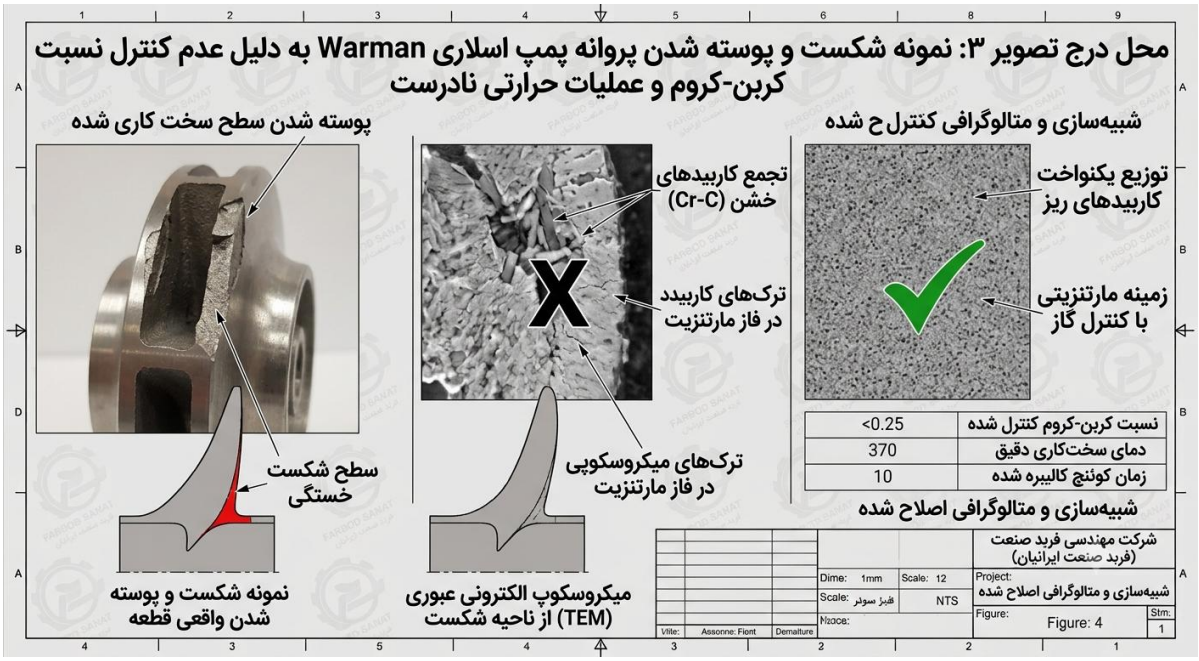
تصویر شماره ۳: تحلیل اثر خطای هندسی پروفیل پره‌ها بر توزیع فشار و کاهش راندمان هیدرولیکی پروانه در شرایط کارکرد

بخش دوم | متالورژی و فناوری قالب‌گیری
۲. چالش‌های تکنولوژی ریخته‌گری پروانه‌های روبسته

در ریخته‌گری پروانه‌های روبسته، به علت شکل هندسی پیچیده و حجم بزرگ ماهیچه، چالش‌های متعددی پیش روی تکنولوژی ریخته‌گری قرار دارد. چنانچه این قطعات به روش‌های سنتی ریخته‌گری شوند، معمولاً دچار عیوب زیر خواهند شد:

- ۱) مک‌های گازی: ایجاد مک‌های بزرگ و کوچک گازی در بدنه و مقاطع پروانه.
- ۲) نیامد (Misrun): نیامد کردن پره‌ها و قسمت‌های نازک قطعه به دلیل افت سیالیت مذاب.
- ۳) ترک‌های انقباضی و گرم: بروز ترک‌های انقباضی و گرم در نواحی حساس و محل اتصال پره‌ها.

کمپانی‌های بزرگ دنیا به دلیل اینکه تعداد زیادی از یک مدل پروانه را تولید می‌کنند، معمولاً از روش‌های ریخته‌گری دقیق (Investment Casting) یا فوم‌کست (Lost Foam) استفاده می‌کنند و عیوب فوق در آن‌ها مجال بروز پیدا نمی‌کند. در تصویر شماره ۴، نمونه پروانه معیوب ناشی از ریخته‌گری و عملیات حرارتی اشتباه را ملاحظه می‌فرمایید:



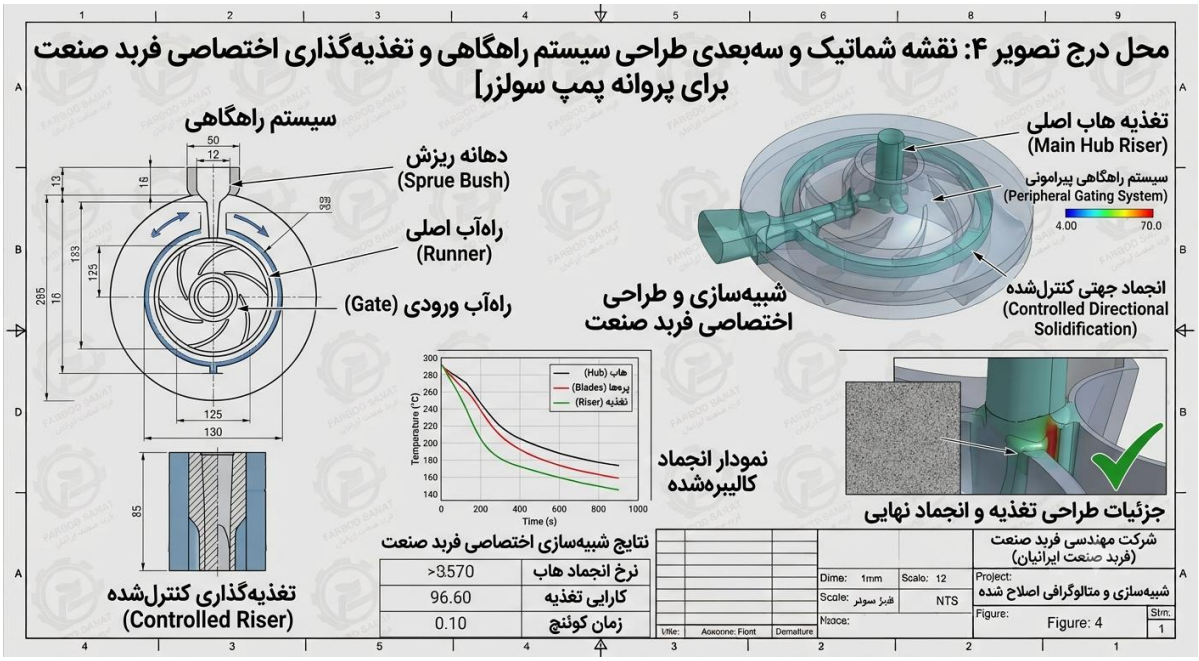
تصویر شماره ۴: بررسی ماکروسکوپی و میکروسکوپی (TEM) شکست و پوسته‌شدن پروانه پمپ اسلاری وارمن ناشی از عدم کنترل نسبت کربن–کروم و عملیات حرارتی نادرست در مقایسه با ساختار اصلاح‌شده

بخش سوم | شبیه‌سازی انجماد و میکروآلیاژها
۳. شبیه‌سازی ریخته‌گری و مهندسی ذوب در فربد صنعت ایرانیان

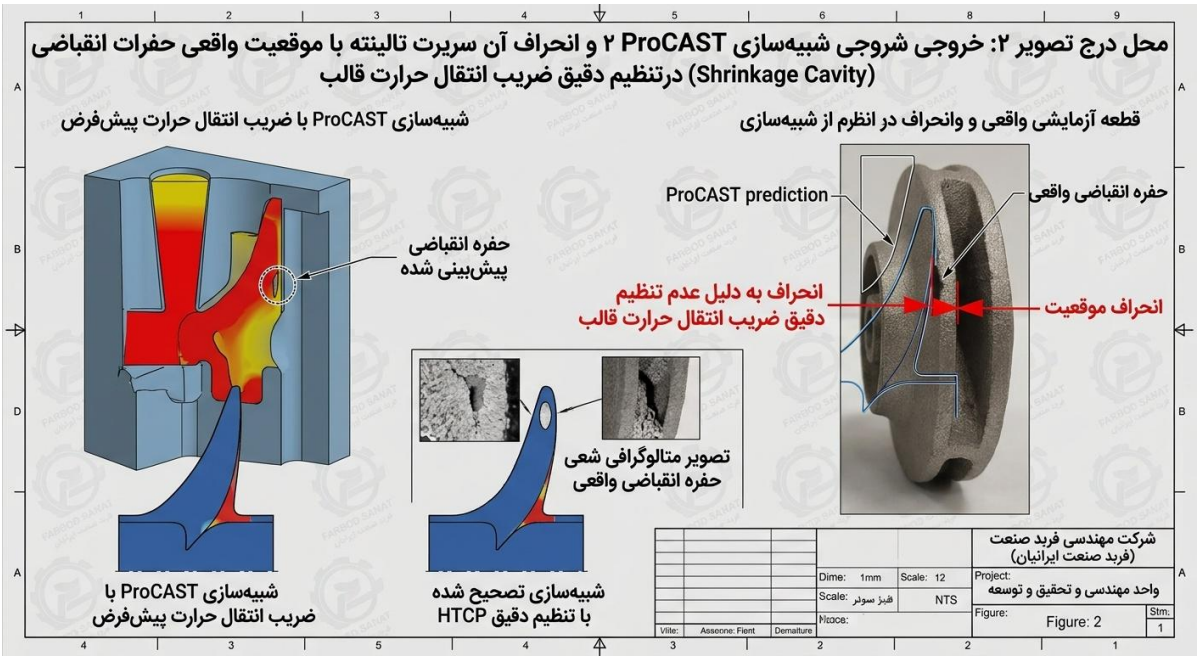
در پروژه‌های بومی‌سازی یک پروانه، ما با تعداد انگشت‌شماری سفارش روبه‌رو هستیم؛ لذا به ناچار می‌بایست از روش ریخته‌گری ماسه‌ای (Sand Casting) که روشی اقتصادی و در دسترس است استفاده کنیم. اما در شرکت فربد صنعت ایرانیان، ما با اتکا به تکنولوژی ریخته‌گری و بهره‌گیری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی همچون SUTCAST و ProCAST، بسیاری از عیوب را پیش از تولید در محیط شبیه‌سازی شناسایی کرده و پارامترهای فرآیند را به گونه‌ای اصلاح می‌کنیم که قطعه با حداقل عیوب ریخته‌گری شود.

در تدوین تکنولوژی ریخته‌گری در شرکت ما، تمامی جزئیات شامل طراحی مدل، انتخاب نوع ماسه و چسب، روش قالب‌گیری، نحوه تهیه ذوب و حتی آنالیز ذوب و تعیین دقیق حد و حدود عناصر—به نحوی که مذاب سیالیت مناسبی داشته و گاز محتوای آن به حداقل برسد—تدوین شده و به صورت دستورالعمل مهندسی مستند می‌گردد. به این ترتیب می‌توان با امکانات موجود در کشور، قطعه‌ای کاملاً سالم ریخته‌گری کرد.

در تصاویر شماره ۵ و ۶، خروجی شبیه‌سازی سیستم راهگاهی، تغذیه‌گذاری و کالیبراسیون ضریب انتقال حرارت قالب برای پیش‌بینی دقیق و حذف حفرات انقباضی نمایش داده شده است:

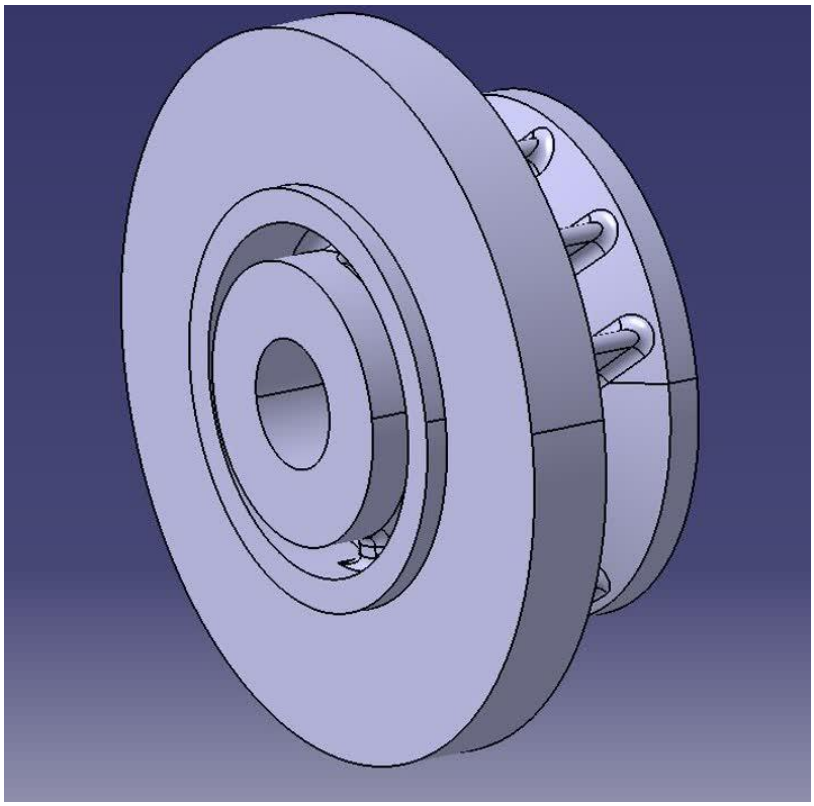


تصویر شماره ۵: نقشه شماتیک و مدل سه‌بعدی طراحی سیستم راهگاهی پیرامونی و تغذیه‌گذاری کنترل‌شده هاب همراه با نمودار انجماد کالیبره‌شده در شرکت فربد صنعت ایرانیان



تصویر شماره ۶: مقایسه خروجی شبیه‌سازی ProCAST با ضریب انتقال حرارت پیش‌فرض و مدل تصحیح‌شده (HTCP) جهت پیش‌بینی دقیق و حذف حفرات انقباضی

ما در شرکت فربد صنعت ایرانیان با آگاهی کامل نسبت به مکانیزم عملکرد پمپ‌های اسلاری، حتی در مرحله ذوب‌سازی با استفاده از تکنولوژی میکروآلیاژها سعی می‌کنیم در دانه‌بندی ساختار میکروسکوپی هنگام انجماد، قطعه‌ای تولید کنیم که عیوب ریخته‌گری کمتر و کنترل‌شده‌تری داشته باشد و بستر مناسب‌تری برای عملیات حرارتی مؤثرتر فراهم کند. این فناوری باعث می‌شود پروانه در برابر سایش مقاوم‌تر شده و عمر بهره‌برداری آن به مراتب بالاتر از نمونه‌های مشابه باشد؛ نکته‌ای که در آنالیزهای شیمیایی معمولی مشخص نیست و در واقع «فوت کوزه‌گری» کمپانی‌های معتبر جهانی محسوب می‌شود.



بخش چهارم | فرایندهای تکمیلی و براده‌برداری
۴. ماشین‌کاری پروانه‌های چدن سفید پرکروم

پروانه‌های پمپ‌های اسلاری معمولاً از جنس چدن سفید پرکروم ریخته‌گری می‌شوند تا در برابر دوغاب حاوی مواد ساینده مقاومت بالایی داشته باشند و همین ویژگی باعث می‌شود به سختی ماشین‌کاری شوند. حتی برای بخش‌هایی که قرار است رزوه شوند، از اینزرت‌های چدنی در داخل قالب ریخته‌گری استفاده می‌شود.

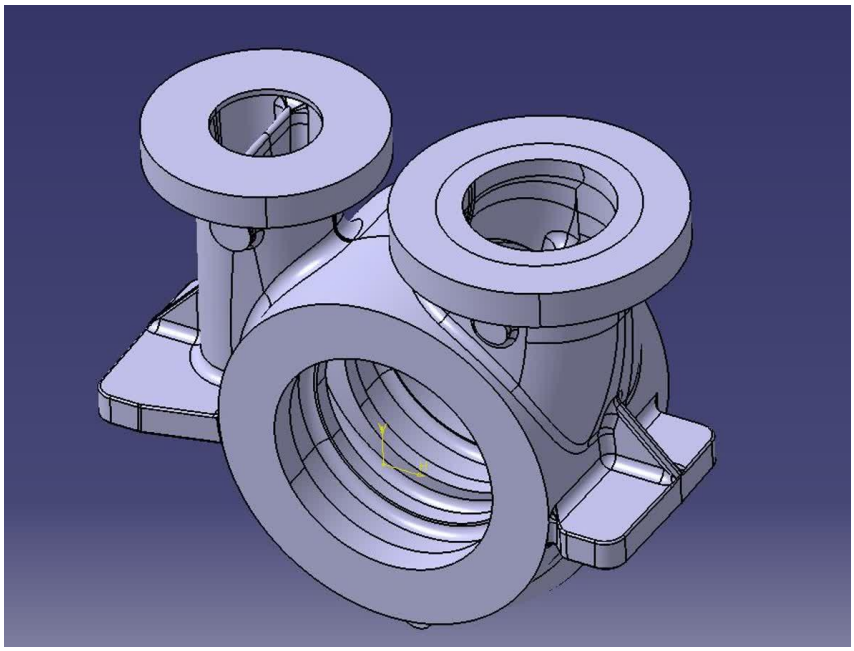
در واقع، قطعه به صورت دوجنسی ریخته‌گری می‌شود؛ به طوری که در بخش مرکزی پروانه که قرار است به شافت متصل شود، جنس قطعه چدن خاکستری است، زیرا این ناحیه با مواد خورنده و ساینده در تماس مستقیم نیست و نیازی به خاصیت ضدسایش ندارد. با این حال، ماشین‌کاری قطعه همچنان سخت و زمان‌بر است؛ از این رو ما در شرکت فربد صنعت ایرانیان با اعمال سیکل عملیات حرارتی آنیل کامل روی پروانه، قابلیت ماشین‌کاری آن را تا حد چشمگیری افزایش می‌دهیم.

بخش پنجم | سیکل حرارتی و سخت‌کاری نهایی

۵. عملیات حرارتی (سخت‌کاری)

عملیات حرارتی برای این گروه از آلیاژها (چدن سفید پرکروم) به علت ماهیت ترد و شکننده آن‌ها بسیار حساس است. از آنجا که قطعه پس از اتمام ماشین‌کاری وارد مرحله عملیات حرارتی می‌شود، باید از سطوح ماشین‌کاری‌شده به دقت محافظت کرد. همچنین سرعت گرم کردن در کوره، کنترل اتمسفر کوره و نحوه استقرار قطعه در کوره یا سبد حمل‌کننده باید به گونه‌ای اجرا شود که کمترین شوک حرارتی به پروانه وارد گردد؛ در غیر این صورت قطعه دچار ترک خواهد شد.

فرآیند عملیات حرارتی این قطعات شامل گرم کردن کنترل‌شده تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، نگهداری در این دما به منظور انحلال آستنیت‌ها و سپس سرد کردن سریع (کوئنچ) است.



جدول مقایسه‌ای رویکرد مهندسی فربد صنعت ایرانیان در برابر ساخت سنتی پروانه پمپ

شاخص فنی و متالورژیکی	کپی‌کاری سنتی و جزیره‌ای	رویکرد مهندسی فربد صنعت ایرانیان
طراحی و هندسه هیدرولیکی	تهیه نقشه ساده از روی قطعه مستهلک بدون اصلاح زوایای ورود و خروج پره	تحلیل عملکردی در مجموعه پمپ + اسکن سه‌بعدی و اصلاح پروفیل سایش‌یافته
فناوری ریخته‌گری ماسه‌ای	ریخته‌گری تجربی و سنتی همراه با بروز مک گازی، نیامد و حفره انقباضی	شبیه‌سازی انجماد (SUTCAST / ProCAST)، تنظیم HTCP و تدوین دستورالعمل ذوب
مهندسی ذوب و متالورژی	اکتفا به آنالیز شیمیایی پایه بدون کنترل ساختار میکروسکوپی انجماد	استفاده هدفمند از میکروآلیاژها جهت ریزدانه‌سازی و ارتقای مقاومت به سایش
ماشین‌کاری و عملیات حرارتی	سختی بیش از حد هنگام ماشین‌کاری و ترک‌خوردگی ناشی از شوک حرارتی	آنیل کامل پیش از ماشین‌کاری + سخت‌کاری کنترل‌شده در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد

بخش ششم | جمع‌بندی و پیام نهایی

۶. الزامات کلیدی دستیابی به کیفیت هم‌تراز با نمونه اصلی

به طور خلاصه، برای ساخت پروانه پمپ‌های اسلاری وارمن با کیفیتی نزدیک و هم‌تراز با نمونه خارجی، تمامی مراحل فوق باید با دیدگاه دقیق تکنیکال به صورت کامل مستند شده، گام‌به‌گام اجرا گردد و با تکیه بر گزارش‌های کنترل کیفیت و عیوب ثبت‌شده در هر مرحله مورد بازنگری قرار گیرد.

مراجع و استانداردهای تخصصی (References)

۱. Sulzer Pumps Technical Quality Specification (PS-3125): *Duplex and Super Duplex Impellers Requirements*.

۲. Sulzer Supplementary Requirements (۴۰-۲۰۲): *Testing Standards & Cast Impellers and Diffusers Quality*.

۳. Weir Warman Slurry Pump Materials Specifications: *High-Chrome Alloy Specifications (A05, A07, A49) and Microstructure Guidelines*.

٤. ASTM A890/A890M: *Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel-Molybdenum (Duplex) for Severe Service*.

٥. MDPI Metals Journal (۲۰۲٤): *Numerical Simulation of Sand Casting and Solidification Defect Prediction of Stainless Steel Impellers*.