DOI: 10.30494/JNDT.2021.277547.1072 Received: March 16, 2021 - Accepted: October 09, 2021

Investigation of Common Defects in Investment Casting by Industrial X-ray Radiography in the Oil and Gas Industry

Setareh Aghaeian*, Ali Kalateh Mollaei, Mohammad Reza Babaei, Hamid Nosrati

Pars Investment Casting Company, Shahroud, Iran
*s_aghaeian@parscasting.com

Abstract

Nowadays, it is of special importance to know the precision casting parts, especially gas turbine parts, and to investigate the reasons for their destruction, due to their special role in power supply and oil and gas transmission. Therefore, the use of alloys capable of withstanding thermal and mechanical stresses and operating at temperatures above 800 ˚C is essential in the manufacture of such parts. Non-destructive testing plays an important role in identifying defective components. Therefore, the use of corrective or preventive actions will be an effective step towards eradicating defects. In this study, we decided to control the behavior of parts by introducing common defects in precision casting and identifying them by X-ray industrial radiography. In this regard, we can mention the types of shrinkage and porosity defects as common defects, and melting temperature, feeding system, number of covering layers, regional temperature, and cooling rate of the base metal as effective factors in causing defects. Identifying and taking action to prevent or reduce defects will decrease production risk, save time, reduce initial and current costs in the application industry and increase the reliability of parts produced and efficiency.

Keywords: Industrial Radiography, Investment Casting, Nondestructive Tests, Precisoon Casting Defects, Gas Turbine

www.SID.ir

DOI: 10.30494/JNDT.2021.277547.1072

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷

شناسایی عیوب متداول در ریخته‌گری دقیق به روش پرتونگاری صنعتی با اشعهٔ ایکس در صنایع نفت و گاز

ستاره آقائیان*، علی کلاته ملائی، محمدرضا بابایی، حمید نصرتی

شرکت ریخته‌گری دقیق پارس، شاهرود، ایران

*s_aghaeian@parscasting.com

چکیده

امروزه، شناخت قطعات ریخته‌گری دقیق، علی‌الخصوص قطعات توربین‌های گازی و بررسی دلایل تخریب آنها، به دلیل نقش ویژه آن‌ها در تأمین برق و انتقال نفت و گاز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، استفاده از آلیاژهایی با قابلیت تحمل تنش‌های حرارتی و مکانیکی و کارکرد در دماهای بالای $^{\circ}C$ ۸۰۰ در ساخت این قبیل قطعات امری ضروری است. آزمون های غیرمخرب نقش مهمی را در شناسایی قطعات معیوب ایفا می‌کند. لذا بکارگیری اقدامات ترمیمی یا پیشگیرانه گامی موثر در راستای حذف عیوب خواهد بود. در این پژوهش، بر آن شدیم تا با معرفی عیوب متداول در ریخته‌گری دقیق و شناسایی آن‌ها با روش پرتونگاری صنعتی با اشعه ایکس، رفتار قطعات را تحت کنترل داشته باشیم. در این راستا می توان به انواع عیوب انقباضی و تخلخل به عنوان عیوب متداول، و دمای ذوب ریزی، سیستم تغذیه گذاری، تعداد لایه های پوششی، حرارت منطقه ای و سرعت سرد شدن فلز پایه به عنوان عوامل موثر در ایجاد عیوب اشاره نمود. شناسایی و اقدام در جهت ممانعت از ایجاد عیوب و یا رفع آنها سبب کاهش ریسک تولید، صرفه‌جویی در زمان، کاهش هزینه‌های اولیه و جاری در صنایع کاربردی و افزایش قابلیت اعتماد به قطعات تولید شده و بازدهی خواهد بود.

کلمات کلیدی: پرتونگاری صنعتی، ریخته‌گری دقیق، آزمون‌های غیرمخرب، عیوب ریخته گری دقیق، توربین گاز.

۱- مقدمه

تاریخ غنی و طولانی ریخته‌گری دقیق[1] به هزاران سال پیش و تولید زیور آلات برنز، مس و طلا، بت‌ها و مجسمه‌ها در مصر باستان و بین‌النهرین، سلسله هان در چین و آزتک در مکزیک برمی‌گردد. به مرور زمان و در اواسط دهه ۱۵۰۰ روش ریخته‌گری دقیق به عنوان یک روش معمول برای ساخت مجسمه‌های برنزی و آثار هنری دیگر مورد توجه قرار گرفت. ریخته‌گری دقیق در سال ۱۸۹۷ توسط یک دندانساز آمریکایی برای مصارف دندانپزشکی مورد استفاده قرار گرفت [۱]. به هر حال صنایع ریخته‌گری تا شروع جنگ جهانی دوم توجه زیادی به این روش نکرده، تا زمانیکه قیمت ماشین ابزارها به دلیل احتیاجات تسلیحاتی بالا رفت، همچنین محدودیت زمانی درتولید قطعات نظامی و صنایع هواپیماسازی که در ضمن باید دارای دقت ابعادی بالا و پرداخت سطحی خوبی باشند موجب گردید تا این روش مورد توجه قرار گیرد. از آنجایی که روش ریخته‌گری دقیق می‌توانست کلیه نیازهای فوق را برآورده سازد، این روش حتی در زمان‌های بعد از جنگ نیز در بسیاری از صنایع غیر هواپیمایی که به قطعات پیچیده و دقیق احتیاج داشتند مورد استفاده قرار گرفت [۲]. ریخته‌گری دقیق به روشی اطلاق می شود که در آن قالب با استفاده از پوشاندن مدلهای از بین رونده توسط دوغاب سرامیکی ایجاد می‌شود. مدل (که معمولا از موم یا پلاستیک است) توسط سوزاندن یا ذوب کردن از محفظه قالب خارج می‌شود. مزایای روش ریخته‌گری دقیق [۳]:

- امکان تولید انبوه قطعات با اشکال پیچیده که توسط روش‌های دیگر ریخته‌گری نمی‌توان تولید نمود.
- امکان تولید قطعات با دقت ابعادی بالا
- امکان تولید کلیه فلزات و آلیاژهای ریختگی و همچنین امکان تولید قطعاتی از چند آلیاژ مختلف.
- امکان تولید قطعاتی با خصوصیات متالورژیکی بهتر.
- قابلیت تطابق ذوب و ریخته‌گری قطعات در خلاء.

[1] Investment Casting

www.SID.ir

- امکان تولید قطعات با حداقل نیاز به عملیات ماشینکاری.
- حذف خط جدایش و حذف عیوبی که در اثر وجود خط جدایش به وجود می آید.
- امکان تولید قطعات ریخته‌گری سنگین تا وزن ۱۰۰ کیلوگرم.

عیوب به وجود آمده ممکن است منشاء مختلفی داشته باشند، به عنوان مثال می‌توان موارد زیر را نام برد [۳]:

- عیوب به وجود آمده از شرایط ذوب و عملیات کیفی مذاب.
- عیوب به وجود آمده از طراحی قطعه ریخته‌گری.
- عیوب به وجود آمده از مدل و جعبه ماهیچه و قالب.
- عیوب به وجود آمده از درجه و تجهیزات کمکی.
- عیوب به وجود آمده از سیستم راهگاهی و تغذیه‌گذاری.
- عیوب حاصل از ماسه قالب (مواد قالب).
- عیوب حاصل از ماهیچه و ماهیچه‌گذاری.
- عیوب حاصل از ترکیب شیمیایی فلزات.
- عیوب حاصل از بارریزی.
- عیوب حاصل از تخلیه قالب، برش راهگاه و...

عیوب متداول در ریخته‌گری دقیق عبارتند از [۴]:

- نیامد[1]: این نوع عیب ازکافی نبودن سیالیت مذاب و کلیه عوامل مؤثر بر کاهش جریان مذاب در پر کردن قالب حاصل می‌گردد. درجه حرارت مذاب مهم‌ترین عامل نیامد محسوب می‌شود.
- سردجوش[2]: این نوع عیب در اثر پایین بودن سیالیت و انجماد زودهنگام مذاب ایجاد می‌گردد، در واقع قالب پر شده ولی جریان مذاب از دو راهگاه به هم آمیخته نمی‌شود. طراحی ناصحیح سیستم راهگاهی و عدم توجه به تعداد راهباره‌ها، وجود آخال و مواد اکسیدی دیگر، سرد بودن قالب و افزایش زمان بارریزی از عوامل مؤثر در بروز این عیب محسوب می‌شوند.
- عیوب انقباضی[3]: اغلب آلیاژها در هنگام انجماد و تبدیل از مذاب به جامد با کاهش حجم روبه رو هستند. برحسب شرایط انجماد و حصول انجماد جهت دار یا همه‌جانبه و همچنین برحسب نوع آلیاژ، کاهش حجم ناشی از انقباض به دو صورت پراکنده و متمرکز در قطعه‌ی ریخته شده مشاهده می‌شود. کشیدگی متمرکز عموماً در سطح قطعه یا در زیرسطح تشکیل می‌شود. در حالی که کشیدگی‌های پراکنده به صورت تخلخل در قسمت‌های داخلی قطعه پراکنده هستند. وجود حفره‌های انقباضی باعث تضعیف خواص مکانیکی قطعه می‌گردد. تعبیه سیستم راهگاهی صحیح، محاسبه تغذیه در اندازه و محل مناسب، تنظیم درجه حرارت فوق ذوب و بارریزی مناسب از روش های جلوگیری از بروز اینگونه عیوب هستند.
- آخال[4]: به‌طور کلی هر نوع ماده غیرفلزی است که در شکل‌ها و حالت‌های مختلف درون قطعه ریخته‌گری حضور می‌یابد. وجود آخال در قطعه ریخته‌گری را در دو حالت بررسی می‌کنند: آخال‌های داخلی (ترکیبی) که در جریان ذوب و آلیاژسازی به دلیل ترکیب عناصر آلیاژی با هوا، یا مواد گاززدا و... حاصل شده و بیشتر ترکیبات اکسیدی و سیلیکاتی هستند. آخال‌های خارجی که از کثیف بودن بار و آغشته بودن آن‌ها به ماسه، شکسته شدن بوته، مواد نسوز یا ماسه شوری در قالب و کنده شدن پوشش قالب حاصل می‌شوند.
- ترک گرم[5]: تنش‌های حرارتی ناشی از انقباض بلافاصله بعد از انجماد موجب شکستگی قطعه ریخته‌گری می‌گردد. در چنین درجه حرارتی قطعه‌ی ریختگی در حداقل مقاومت و استحکام قرار دارد. ترک گرم دارای شکل خطی نامنظم و غیرمستقیم می‌باشد و همچنین سطوح ترک، اکسید شده‌اند. ترک گرم نیز ممکن است داخلی یا بیرونی باشد که نوع داخلی آن به دلیل عدم تشخیص اولیه و احتمال کاربردهای بعدی خطرناک‌تر است. در عمل با تغییر ضخامت موضعی قطعه می‌توان ایجاد این عیب را محدود کرد.
- تخلخل گازی[6]: این نوع عیب در اکثر فلزات ریخته‌گری نظیر فولاد، آلومینیم، مس، منیزیم و آلیاژهای آن‌ها مشاهده می‌شود. علت اصلی به وجود آمدن آن خروج گازهای محلول در مذاب و تشکیل ترکیبات گازی در اثر واکنش‌های موجود در مذاب می‌باشد.

یکی از مهم ترین کاربردهای قطعات تولید شده به روش ریخته‌گری دقیق در صنایع نفت و گاز و نیروگاهی می‌باشد. به طور مثال پره‌های توربین گاز به دلیل قرارگیری در مسیر گاز داغ توربین، شرایط دشوار کاری را تحمل می‌کنند و همواره در معرض عیوب و خسارات ناشی از دمای بالای گاز

---

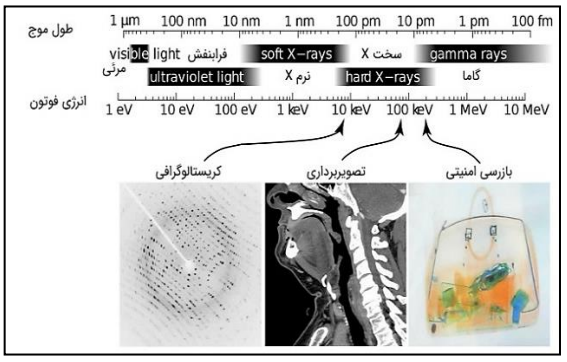
[1] Misrun
[2] Cold shut
[3] Shrinkage
[4] Inclusion
[5] Hot tear
[6] Gas Porosity

www.SID.ir

ورودی و سایش قرار دارند [۵]. این پره‌ها به طور معمول ۵ تا ۷ درصد هزینه های توربین را شامل می‌شوند و بدلیل کارکرد در دماهای بالا و نیز بارگذاری پیچیده در شرایط سرویس همواره در معرض مکانیزم‌های تخریب متفاوتی قرار دارند که بکارگیری آنها را توام با ریسک نموده است. از طرف دیگر در سال‌های اخیر افزایش دمای گازهای ورودی به توربین با هدف بهبود راندمان در دستور کار سازندگان این تجهیزات قرار گرفته است، بطوریکه دمای گازهای ورودی به توربین در هر سال بطور متوسط ۱۳ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در نتیجه این قطعات هر روز در معرض دماهای کارکرد بالاتر قرار می‌گیرند که در برخی موارد حتی تا ٪۷۵ نقطه ذوب آلیاژ نیز افزایش یافته است. قسمت‌های مختلف یک توربین در معرض بارها و تنش‌های حرارتی و عوامل خورنده مختلف قرار دارند. بارهایی که به اجزای یک توربین وارد می‌شوند شامل نیروهای گریز از مرکز و نیروهای ناشی از شتاب‌گیری در هنگام راه‌اندازی و تنش‌های حرارتی و پیش‌تنش‌ها و تنش‌های باقی‌مانده در فرایند ساخت می‌باشند. به دلیل بارهای وارد شده به توربین، آلیاژها دچار آسیب و تغییر ساختار می‌شوند. مکانیزم‌های مختلفی باعث تغییر ساختار مواد و آسیب قطعات توربین‌ها می‌شوند. این مکانیزم‌ها عبارتند از خزش و خستگی و خوردگی و تنش‌های مکانیکی که باعث ایجاد ترک می‌شوند [۶]. اما بیشتر آسیب‌های مکانیکی ناشی از خرش و خستگی با سیکل کند (مانند تنش‌های حرارتی) هستند. تخمین میزان آسیب به اجزای مختلف توربین کمک می‌کند تا هزینه اقتصادی و فنی استفاده طولانی‌تر از آن مشخص شود. از اینرو مجموعه این عوامل باعث می‌شود تا مکانیزم‌های متفاوتی در جهت تخریب پره‌های توربین فعال شوند و باعث کاهش عمر مفید آنها گردند. یکی از بهترین راه‌های تخمین عمر و بازرسی توربین‌ها و اطمینان از قابلیت کارکرد پره در شرایط مذکور، تست‌های غیرمخرب هستند. در این پژوهش به کاربرد رادیوگرافی صنعتی با اشعه ایکس در تشخیص عیوب متداول در ریخته‌گری دقیق پرداخته می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده، شناسایی این قبیل عیوب و اقدام در جهت ممانعت از ایجاد و یا رفع آنها سبب کاهش ریسک تولید، صرفه‌جویی در زمان، کاهش هزینه‌های اولیه و جاری در صنایع کاربردی و افزایش قابلیت اعتماد به قطعات تولید شده و بازدهی خواهد بود.

پرتونگاری صنعتی نوعی آزمایش غیرمخرب است که با استفاده از تابش یونیزه کننده، مواد و اجزای آن را با هدف شناسایی عیوب و موقعیت آنها، و یا تغییر خواص ماده که منجر به شکست ساختارهای مهندسی می‌شود، بررسی می‌کند. این نوع تست نقش مهمی در علم و فناوری مورد نیاز برای اطمینان از کیفیت و قابلیت اطمینان محصول دارد. اشعه ایکس دارای طول موج کوتاه (0.01 ~ 10 nm) بوده و به همین دلیل انرژی بسیار زیاد و قدرت نفوذ به درون قطعه را دارد (شکل ۱).

عبور این پرتوها از هر محیطی همراه با تضعیف و جذب قسمتی از آن توسط محیط است. بدیهی است که هرچه ماده ضخیم‌تر باشد، اشعه ایکس کمتر می‌تواند از آن عبور کند. میزان تضعیف تحت تأثیر چندین عامل است که شامل چگالی و ساختار محیط و همچنین نوع، شدت و انرژی فوتون پرتو خواهد بود. پس از عبور از جسم، فوتون‌ها توسط یک ردیاب مانند یک فیلم رادیوگرافی صنعتی با امولسیون هالید نقره، یک صفحه فسفر (CR) یا یک آشکارساز صفحه تخت گرفته می‌شوند. وجود هرگونه عیب که دارای چگالی متفاوتی با قطعه باشد باعث کاهش یا افزایش میزان اشعه عبوری از قطعه می‌شود.

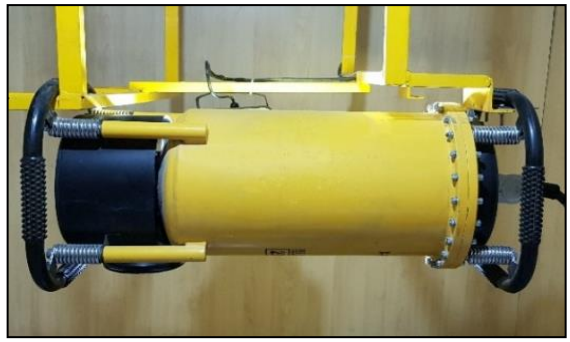


شکل ۱- محدوده طول موج و انرژی فوتون

۲- روش تحقیق

جهت انجام تست رادیوگرافی، با توجه به رنج ضخامتی قطعات تولید شده به روش ریخته‌گری دقیق مورد بررسی در کار حاضر، از دستگاه با ولتاژ 250 KV جریان 5 mA و 300 KV جریان 5 mA (به ترتیب شکل شماره ۲ و ۳) استفاده می‌شود. به طور کلی با مراجعه به نمودارهای مرجع می‌توان شدت جریان و ولتاژ مناسب را بر اساس ضخامت قطعه مورد نظر انتخاب نمود.

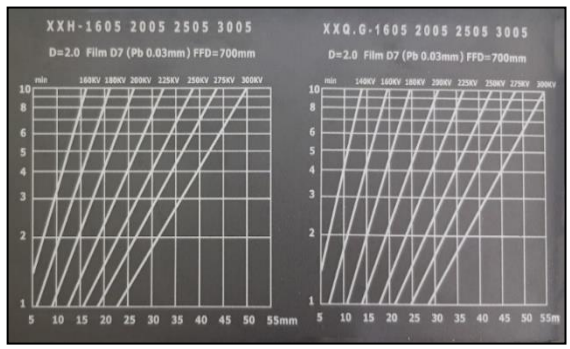
www.SID.ir



شکل ۲- دستگاه رادیوگرافی صنعتی 250 KV

شکل ۳- دستگاه رادیوگرافی صنعتی 300 KV

شکل شماره ۴ نمونه این نمودار را نشان می‌دهد. کیفیت رادیوگرافی بر اساس میزان جزئیات قابل تشخیص از تصویر و شاخص کیفیت تصویر[1] بیان می‌شود. شاخص‌های کیفی مورد استفاده در صنعت به صورت صفحه‌ای و سیمی هستند که کاربرد گسترده‌ای دارند. در شاخص های کیفی سیمی، سیم‌ها به صورت منظم از قطر ۰,۱ تا ۳,۲ میلی‌متر و با طول‌های مشابه قرار گرفته‌اند. جنس سیم نیز حتما باید منطبق با قطعه مورد آزمایش در تست رادیوگرافی انتخاب شود.



شکل ۴- نمودار ضخامت با ولتاژ

نمونه شاخص کیفیت تصویر مورد استفاده در کار حاضر در شکل ۵ نشان داده شده است. در حالت کلی فیلم رادیوگرافی شامل یک لایه ژلاتینی است که برروی یک ترکیب نقره‌ای حساس به تشعشع قرار گرفته و کل آن بر روی یک صفحه شفاف قرار دارد. حضور ترکیب نقره‌ای حساس به تابش در دو طرف صفحه سبب افزایش سرعت می‌گردد. در مواردی که جزئیات بیشتری برای نمایش مد نظر باشد، از ترکیب نقره‌ای فقط در یک طرف صفحه استفاده می شود. هنگامی که یک فیلم در محلول شیمیایی ظهور قرار می‌گیرد، واکنشی بین فیلم و ماده ظهور رخ داده و نقره فلزی سیاه به وجود می‌آید. این نقره در ژلاتین در دو طرف صفحه به صورت معلق وجود دارد که سبب ایجاد تصویری از جسم می‌شود [۷].

شکل ۵- نمونه I.Q.I

انتخاب فیلم رادیوگرافی وابسته به ضخامت و جنس ماده نمونه مورد آزمایش و دامنه ولتاژ دستگاه است. به علاوه عواملی مانند کیفیت بالای رادیوگرافی یا زمان تابش کوتاه نیز موثر هستند. مشخصات دو نوع فیلم مورد استفاده در این پژوهش با کد Carestream MX-125 و Carestream AA-400 به ترتیب در شکل شماره ۶ و ۷ نشان داده شده است. به منظور تعیین تراکم اپتیکی فیلم رادیوگرافی از دانسیته متر اپتیکی ۲ (شکل ۸) استفاده می‌شود. دانسیته رادیوگرافی لگاریتم حاصل قسمت دو پارامتر است (معادله شماره ۱): شدت نور روی فیلم۳ و شدت نوری که از فیلم عبور می‌کند[4]. جهت پردازش و ظهور تصاویر نیز از دستگاه ظهور اتوماتیک برند Optimax (شکل ۹) استفاده می‌شود.

[1] Image Quality Indicator (I.Q.I)

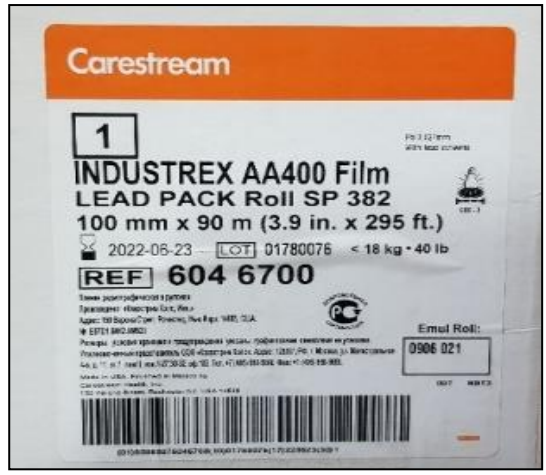
[2] Optical Densitometer

[3] Intensity of light incident on the film (I_O)

[4] Intensity of light transmitted through the film (I_t)

www.SID.ir

شکل ۶- فیلم رادیوگرافی Carestream MX-125



شکل ۷- فیلم رادیوگرافی Carestream AA-400

شکل ۸- دانسیته متر اتوماتیک

شکل ۹- دستگاه ظهور

$$D = \log \frac{I_o}{I_t} \qquad (۱)$$

D: دانسیته اپتیکی فیلم

در این پژوهش از آلیاژ هستلوی ایکس[1] جهت ریخته‌گری قطعات استفاده شده و آنالیز شیمیایی به روش اسپکترومتری نشری پلاسمای جفت شده القایی[2] انجام گرفته که ترکیب شیمیایی آلیاژ مذکور در جدول ۱ ارائه شده است [۸]. خواص فیزیکی[3] و خواص مکانیکی[4] این آلیاژ به ترتیب در جدول ۲ و ۳ درج شده است [۹].

هستلوی ایکس یکی از انواع مهم و پرکاربرد سوپرآلیاژها می‌باشد که به دلیل خواص ویژه‌ای که دارد، به این نام شناخته می‌شود و کاربردهای گسترده‌ای در صنعت دارد. هستلوی ایکس یک سوپر آلیاژ نیکل-کروم- آهن- مولیبدن می‌باشد، که مقاومت به اکسیداسیون بالایی دارد و در دمای بالا استحکام خود را تا حد بسیار مناسبی حفظ می‌کند، همچنین کارپذیری این ماده مناسب است و امکان تولید قطعات متنوعی وجود دارد. به دلیل حفظ استحکام مناسب این سوپرآلیاژ مقاومت به خزش آن بالا می‌باشد. خزش در واقع تغییر شکل ماده در طول زمان در تنش های پایین تر از تنش تسلیم آن می‌باشد.

[1] Hastelloy X
[2] ICP-OES
[3] Physical Properties
[4] Mechanical Properties

www.SID.ir

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ هستلوی ایکس

عنصر	درصد حجمی	
	مینیمم	ماکزیمم
کربن	۰,۰۵	۰,۱۵
منگنز	-	۱,۰۰
فسفر	-	۰,۰۴
سولفور	-	۰,۰۳
سیلیسیوم	-	۱,۰۰
کروم	۲۰,۵۰	۲۳,۰۰
نیکل	-	فلز پایه
مولیبدن	۸,۰۰	۱۰,۰۰
اهن	۱۷,۰۰	۲۰,۰۰
تیتانیوم	-	۰,۱۵
آلومینیوم	-	۰,۵۰
کبالت	۰,۵۰	۲,۵۰
مس	-	۰,۵۰
تنگستن	۰,۲۰	۱,۰۰

جدول ۲- خواص فیزیکی آلیاژ هستلوی ایکس

چگالی	نقطه ذوب
۸,۲۲ gr/cm^3	۱۲۶۰-۱۳۳۵ °C

جدول ۳- خواص مکانیکی آلیاژ هستلوی ایکس

تنش تسلیم[1]	تنش نهایی[2]	افزایش طول[3]	مدول الاستیسیته[4]
۴۵۸ MPa	۶۱۵ MPa	%۴۹,۵	۲۰۵ GPa

فلزات معمولی با افزایش حرارت با کاهش شدید سختی و استحکام مواجه می‌شوند، به همین دلیل احتمال وقوع خزش در دماهای بالا در زمان‌های کم، محتمل‌تر می‌باشد. اما این سوپر آلیاژ به دلیل ترکیب شیمیایی و ریز ساختاری که دارد تا حد مناسبی در برابر خزش مقاومت نشان می‌دهند. برای مثال در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد این آلیاژ قابلیت کاربری به مدت ۱۰ هزار ساعت تحت تنش ۲۳۵ مگاپاسکال را دارد [۱۰].

۳- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد عوامل متعددی مانند درجه حرارت نامناسب مذاب، سیستم راهگاهی نامناسب، فلز نامناسب باتوجه به شرایط کاری و ... در ایجاد عیوب سطحی و زیر سطحی در ریخته‌گری دقیق نقش دارند. لذا به دلیل انتخاب نادرست پارامترهای ریختگی، عیوبی در قطعه ایجاد می‌شود که عدم شناسایی و رفع آنها منجر به بروز خسارات جبران ناپذیری در کاربردهای صنعتی خواهد شد. در این راستا شناسایی عیوب زیر سطحی، به دلیل قابلیت تشخیص محدودتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و تست رادیوگرافی یکی از بهترین روش‌های بازرسی و اطمینان از قابلیت کارکرد قطعه در شرایط بحرانی دما و فشار بالا می‌باشد. در کار حاضر عیوب متداول در ریخته‌گری قطعات توربین گاز از جنس هستلوی ایکس شناسایی شده‌است. با توجه به مقاومت بالای این آلیاژ به اکسیداسیون و خوردگی و تحمل حرارتی بالا، در ریخته‌گری دقیق و ساخت پره‌های توربین جت و قطعات مختلف موتور که در دماهای بالا کار می‌کنند، کاربرد دارد [۱۱].

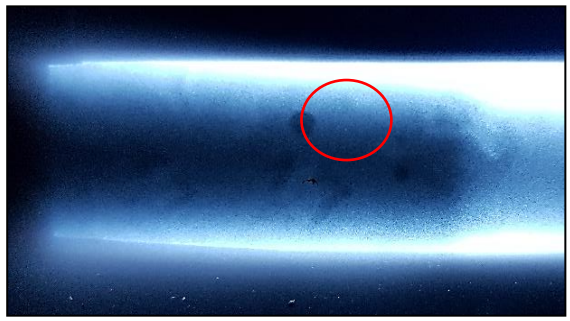
متداول‌ترین نوع عیب، وجود حفره‌های انقباضی[5] بوده که خواص مکانیکی قطعه را تضعیف کرده و سبب تخریب قطعه پس از مدت زمان کارکرد در دمای بالا خواهد شد. شکل ۱۰ نمونه حفره انقباضی را در قطعات توربین گاز نشان می‌دهد که علت ایجاد آن پایین بودن دمای کار قالب و کم بودن ضخامت لایه پوششی در قسمت‌های مختلف بوده است. با تنظیم دما و افزایش ضخامت لایه پوششی در سایر قطعات ریخته‌گری شده با شرایط یکسان، این عیب مشاهده نگردید.

عیوب انقباضی شاخه‌ای[6] و رشته‌ای[7] که به دلیل سیستم راهگاهی نادرست و یا مناسب نبودن دمای ذوب ایجاد می‌شوند، به ترتیب در شکل ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند. با توجه به هندسه قطعات مورد بحث در این کار، با تغییر طراحی سیستم راهگاهی، افزایش دمای ذوب ریزی و استفاده از عایق حرارتی در ریخته‌گری های بعدی این قبیل عیوب به طور کامل حذف شد. از دیگر عیوب انقباضی متداول در ریخته‌گری می‌توان به عیب اسفنجی[8] اشاره کرد که در قطعات ریخته‌گری دقیق مورد بحث در کار حاضر، به دلیل دمای بارریزی نامناسب و سرد شدن غیر یکنواخت این عیب ایجاد شده است. پس از چند نمونه ریخته‌گری با

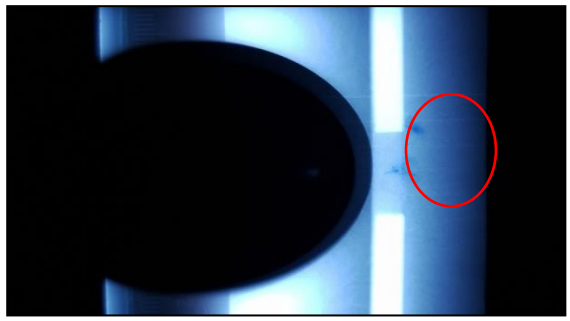
[1] Tensile Strength, Yield
[2] Tensile Strength, Ultimate
[3] Elongation at Break
[4] Modulus of Elasticity
[5] Shrinkage Cavity
[6] Shrinkage Dendritic
[7] Shrinkage Filamentary
[8] Shrinkage Sponge

www.SID.ir

افزایش دمای ذوب و کنترل سرعت سرد شدن منطقه‌ای توسط عایق‌های حرارتی با ضخامت مناسب، در راستای حذف این عیب اقدام شده است. نمونه عیب انقباض اسفنجی را می‌توان در شکل شماره ۱۳ مشاهده نمود. نمونه ای از تخلخل‌های گازی که به دلیل کاهش حلالیت گاز در فلز و عدم امکان خروج تمام یا بخشی از آن اتفاق می‌افتد در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

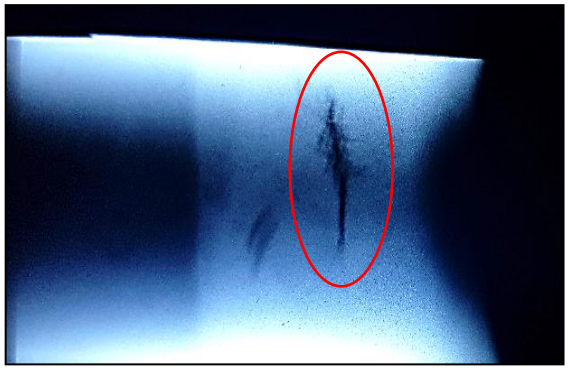


شکل ۱۰- حفره انقباضی



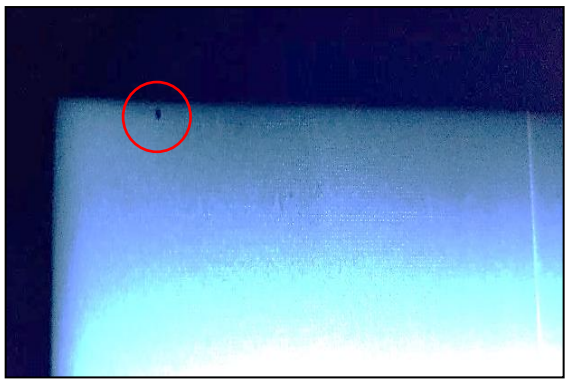
شکل ۱۱- انقباض شاخه‌ای

در کار حاضر با تغییر سیستم راهگاهی به منظور ایجاد مسیر مناسب جهت خروج گازها، از بروز تخلخل‌ها جلوگیری شد. درجه حرارت بارریزی در ایجاد این نوع عیب برحسب نوع آلیاژ و شرایط سردشدن نیز بسیار موثر است. همانطور که گفته شد ناخالصی‌ها در جریان ذوب ایجاد می‌شوند، در شکل شماره ۱۵ نمونه این نوع عیوب را می‌توان به وضوح مشاهده کرد. در این تحقیق به طور همزمان با کاهش درجه حرارت ذوب‌ریزی، سرباره‌گیری و استفاده از فیلتر مناسب در جهت حذف ناخالصی‌ها اقدام شده است.



شکل ۱۲- انقباض رشته‌ای

شکل ۱۳- انقباض اسفنجی



شکل ۱۴- تخلخل گازی

شکل ۱۵- ناخالصی (آخال)

www.SID.ir

۴- نتیجه‌گیری

- به طور کلی تست غیرمخرب بطور گسترده برای بازرسی‌های روزانه، نگهداری و کنترل کیفیت قطعات مختلف در صنایع، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اعتبار هر روش تست غیرمخرب، سنجشی از کارائی آن روش درباره آشکارسازی نوع، شکل، اندازه و موقعیت عیوب است.
- هیچ یک از روش‌های تست غیرمخرب به تنهایی برای ارزیابی تمام انواع عیوب و یا اندازه‌گیری‌ها بکار برده نمی‌شود. تست رادیوگرافی صنعتی با اشعه ایکس، در صورت استفاده از تجهیزات قابل اعتماد و نیروی انسانی مجرب از توانایی و میزان اعتماد قابل قبولی در شناسایی عیوب زیر سطحی برخوردار است.
- شناخت دقیق عیوب ریخته‌گری منجر به بررسی و شناسایی علل ایجاد آنها شده که با رفع اینگونه موارد می توان قطعات با کیفیت بالاتر تولید و فرآیند ریخته‌گری دقیق بهینه‌سازی گردد. بدین صورت در زمان، هزینه و نیروی انسانی صرفه جویی خواهد شد، ریسک تخریب تا حد زیادی کاهش یافته و در صورت لزوم با تعیین مدت زمان به کارگیری می‌توان طول عمر کارکرد قطعه را تخمین زد.
- عیوب انقباضی متداول‌ترین نوع عیوب زیر سطحی در روش ریخته‌گری دقیق هستند که با رادیوگرافی صنعتی قابل شناسایی می‌باشند. بهبود دمای پیش‌گرم و ذوب‌ریزی، اصلاح سیستم تغذیه‌گذاری، تنظیم تعداد لایه‌های پوششی و حفظ حرارت منطقه‌ای با استفاده از مواد عایق حرارتی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در حذف عیوب نامبرده می‌باشند.
- درجه حرارت بارریزی و شرایط سردشدن، پارامتری موثر در به وجود آمدن تخلخل در قطعه می‌باشد. اصلاح سیستم راهگاهی و ایجاد مسیر مناسب جهت خروج گازها نیز منجر به حذف این عیوب خواهد شد.
- اصلاح سیستم راهگاهی، افزایش دمای ذوب‌ریزی و استفاده از عایق حرارتی سبب حذف عیوب انقباضی خواهد شد.
- با کنترل دمای بارریزی و سرعت سرد شدن، می توان در راستای کاهش و یا حذف عیوب اسفنجی اقدام نمود.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله لازم می دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از تمامی همکاران شاغل در مجموعه ریخته‌گری دقیق پارس، به ویژه جناب آقای مهندس علی مخدومی مدیریت کارخانه و جناب آقای مهندس امیرمهدی شبانی سرپرست واحد مهندسی تولید اعلام نمایند.

۶- منابع

[1] Asgar. K., “Casting Metals in densitry, Past-Present-Future”, PMID 3073783. S2CID 17215227. Advances in dental research. 1988.

[2] Dinghua Zhang, Yunyong Cheng, Ruisong Jiang, Neng Wan “Turbine blade investment casting die technology” ISBN 978-3-662-54186-9, Springer. 2018

[3] American Society for Metals; ASM International Handbook Committee; ASM International Alloy Phase Diagram Committee (1990), ASM Handbook: Casting, 15 (10th ed.), ASM International, ISBN 978-0-87170-021-6.

[4] Markee, J., “Atlas of Casting Defects”, An Investment Castig Institude Publication. 2017

[۵] ملایی، ن، نامی، ب، پرویزی، س، ۱۳۹۸، "تاثیر متغیرهای دما و زمان پیرسازی نهایی برخواص مکانیکی و ریزساختار اینکونل۷۹۲"، *مجله مهندسی مکانیک*، شماره پیاپی ۸۸، صفحه ۳۲۵-۳۱۹

[۶] کلاگر، ع، ۱۳۸۸، "مکانیزم های شکست پره های توربین های گاز از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل"، *اولین کنفرانس ملی صنعت نیروگاه های حرارتی*، تهران، ایران.

[7] Wegst, C. “Key to Steel” Handbook. 2019 edition

[8] “ASM Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control” ISBN 0871700077. ASM INTERNATIONAL. 1992.

[9] Alloy International, INC. https://alloysintl.com

[10] Henschel, S., Dudczig, S., 2016, “Effect of non-metallic inclusions and shrinkage cavities on the dynamic fracture toughness of a high-strength G42CrMo4 cast steel”.

[11] Pollock, T. M., Tin, S., 2006. "Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties", Journal of propulsion and power, Vol. 22, 361-374.

www.SID.ir