نشریه علمی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

مقاله پژوهشی:

مشخصه‌یابی ریزساختاری و رفتار خزشی یک پره توربین از سوپرآلیاژ پایه نیکل CM88Y ریختگی

محمد نجمی[۱]، سید محمد حسین میرباقری*[۲]، علی صالحی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

۳- کارشناس شرکت انتقال گاز ایران.

* **نویسنده مکاتبه کننده:** Email: smhmirbagheri@aut.ac.ir ،

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹

چکیده:

در این پژوهش به بررسی خواص خزشی و تغییر ریزساختار متالورژیکی پره‌های توربین گازی تولید شده به روش ریخته‌گری دقیق پرداخته می‌شود. این پره‌ها که آلیاژهای پایه نیکل هستند، طبق استانداردهای اوکراینی با نام یا گرید CM88Y شناخته و در صنعت نیروگاه انتقال گاز ایران مصرف می‌شوند از این رو اطلاعات فنی آن محدود است. در پژوهش حاضر سعی شده، ضمن معرفی این آلیاژ، خواص مکانیکی، خزشی و همچنین ریزساختار آن؛ برای یک پره مستعمل ۱۸ هزار ساعت و پره ۶ هزار ساعت اندازه‌گیری و با مقادیر مجاز استاندارد، مقایسه شود. نتایج نعداد قابل توجهی آزمون‌های مخرب، به کمک پارامتر لارسون-میلر، نشان می‌دهد، پره ۱۸۰۰۰ ساعت با داشتن منطقه تمرکز حرارتی، به علت حذف یا سایش موضعی پوشش سد حرارتی، دچارکاهش عمر خزشی به میزان ۳۸۰۰ ساعت شده است. همچنین فاز گاما پریم ثانویه از حالت مکعبی به کروی تبدیل شده و پدیده به هم پیوستن فازهای گاماپرایم ثانویه، در این پره‌ها رخ داده است.

واژه‌های کلیدی:

آلیاژ CM88Y ریختگی،

خزش،

تنش، اندیس لارسن میلر،

مشخصه‌یابی،

ساختار میکروسکوپی.

ارجاع به این مقاله:

محمد نجمی، سید محمد حسین میرباقری، علی صالحی، مشخصه‌یابی ریزساختاری و رفتار خزشی یک پره توربین از سوپرآلیاژ پایه نیکل CM88Y ریختگی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۴۰۱، جلد ۶، شماره ۲، صفحات ۱۱۳-۱۲۴.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2023.391115.1177

۱- مقدمه

در صنایع انتقال گاز بین شهری در ایران عموماً از دو مدل توربین گازی با منشاء ساخت کشور آمریکا و روسیه استفاده می‌شود. در ده‌های اخیر، استفاده از توربین‌های گازی ساخت کشور اوکراین در ایران رایج شده است. این توربین‌های گازی، در ایران با برند زوریا (ZORYA) در بیشتر مناطق سردسیر و حتی گرم و خشک (مثل سراجه قم) استفاده می‌شوند. منتهی میزان خرابی انها در مناطق گرم و خشک که عموما با طوفان گرد و غبار است در فصل تابستان، زیاد است. در محفظه توربین‌های زوریا، در منطقه فشار بالا (HP) از پره‌های ریختگی پایه نیکل به نام آلیاژ CM88Y استفاده می‌شود. این نام‌گذاری، با تبدیل حروفی روسی به انگلیسی، در استاندارد اوکراین تعریف شده [۲-۱]. عموما تمامی پره‌های منطقه HP توربین‌های گازی، خصوصا پره‌های پایه نیکل، به روش ریخته‌گری دقیق تولید می‌شوند. سپس با تمیزکاری سطحی اولیه در کوره‌های خلا یا اتمسفر کنترل؛ عملیات حرارتی می‌شوند، به طوری که فازهای گاما پرایم؛ در زمینه آستنیتی گاما، پراکنده می‌شوند. در صورتی که عملیات رسوب پراکنی و پیرسازی در این آلیاژ درست انجام شود، آلیاژCM88Y می‌تواند در سطوح دما و تنش بالا به مدت طولانی کارکرد داشته باشند. در منابع روسی این مدت زمان تئوری تا ۱۰۰ هزار ساعت اشاره شده؛ ولی با اعمال ضریب اطمینان، حداکثر می‌توان آن را در مناطق سردسیری تا حدود ۵۰ هزار ساعت و در مناطق خشک و گرم تا ۳۵ هزارساعت تضمین نمود. شرکت ZORYA MASHPROEK، در کشور اوکراین طی یک گزارش داخلی، اکثرخواص آلیاژهای پایه نیکل مقاوم به حرارت را فهرست‌بندی و خواص دمای محیط و دمای بالای آنها را به طور کامل ارایه داده است [۳].

لازم به ذکر است، دو آلیاژ CM88Y و CM88 با هم تفاوت زیادی دارند و در عناصری مانند آلومینیم، تیتانیم و نیتروژن این اختلاف حائز اهمیت است[۳]. در مورد رفتار خزشی و دمای بالای آلیاژCM88Y اطلاعات بسیار کمی وجود دارد و این منابع عمدتا به زبان روسی هستند [۴]. یکی از مهمترین نیازها در مورد این آلیاژ، عدم دسترسی به منحنی‌های لارسون-میلر دقیق آنها است. اکثر منحنی‌ها فاقد نقاط اندازه‌گیری آزمون‌های خزش در روی منحنی لارسون-میلر، است و فقط به ارایه منحنی بسنده نموده‌اند [۵]. در مورد آلیاژ CM88Y، اکثر داده‌ها، فقط یک منحنی میان‌یابی شده است و میزان واریانس آنها مشخص نیست. موضوع دیگر، ثابت لارسون-میلر است که به طور تقریبی آن را بین ۱۹ الی ۲۱ اعلام می‌کنند. در صورتی که منبع معتبری آن را بیان یا اندازه‌گیری ننموده است.

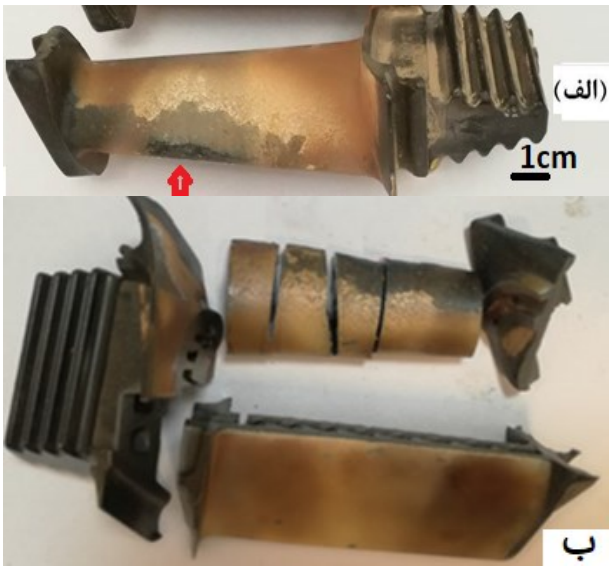
در زمینه رفتار خزشی آلیاژ CM88Y، در ایران تلاش‌های شده است که بیشتر آنها، محرمانه شرکت‌های سازنده است. همچنین تعدادی کمی منبع در مورد عملیات حرارتی آلیاژ CM88Y به صورت دانشگاهی موجود است [۵-۶]. در این منابع به ترکیب شیمیایی، ریزساختار فازی و بعضی از خواص مکانیکی این آلیاژ اشاره شده و بیشتر محدود به تغییر رفتار کششی-داغ این آلیاژ در اثر سیکل عملیات حرارتی متفاوت است. همچنین رفتار خزشی آنها به ندرت منتشر شده است.[۳، ۵].

نکته قابل توجه، وجود تفاوت در درصد وزنی بعضی عناصر نادرخاکی در آلیاژهای روسی با سایر سازنده‌ها است، که می‌تواند روی افزایش عمر خزشی موثر باشد؛ خصوصا در پره‌های توربین تک کریستال[۶-۹]. نکته قابل تامل برای ارایه خواص خزشی آلیاژ CM88Y اوکراینی، عدم استفاده از نمونه‌برداری از خود پره توربین است. اکثر نمونه‌ها؛ به صورت میله و کاروت بوده‌اند و هیچگاه پره واقعی از آلیاژ CM88Y، تخریب نشده است.

در این پژوهش تلاش شده، رفتار خزشی آلیاژ CM88Y و ارتباط آن با ریزساختارش برای قطعه پره توربین گازی، اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گیرد. عمر خزشی در تنش و دماهای کاری این آلیاژ، در توربین گازی زوریا، مورد کنکاش قرار گرفته و نتایج آن ارایه شده است. به نظر می‌رسد این تحقیق به علت در اختیار گذاشتن بسیاری از داده‌های بسیار کمیاب سازنده اوکراینی در مورد آلیاژ CM88Y منبعی با ارزشی برای محققین ایرانی در تعین عمر خزشی پره‌های توربین گازی باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر، ابتدا تعداد پنج عدد پره مستعمل ردیف اول توربین زوریا، مطابق شکل (۱-الف)، از کارفرما تحویل و مجوز تخریب آنها، گرفته شد. سپس آنالیز شیمیایی پره به دو روش کوانتومتری و ICP مشخص شد. در قدم دوم، نتایج بدست آمده با آنالیز مجاز سازنده اوکراینی، مقایسه شد. در قدم سوم پره‌ها تخریب و از آنها نمونه‌های کشش و خزش تهیه شد و کلیه آزموهای مکانیکی و متالورژیکی لازم روی آنها انجام شد تا ارتباط خواص با ریزساختار متالورژیکی مشخص شود.



شکل ۱- پره های CM88Y مستعمل. الف) پره ۱۸۰۰۰ ساعت با ایجاد عیب Hot Spot، ب) برش پره برای ازمون‌های مخرب.

در جدول (۱)، در ردیف اول ترکیب شیمیایی اسمی آلیاژ CM88Y از شرکت زوریا اوکراینی بر حسب درصد وزنی ارایه شده است. در ردیف‌های ۲ و ۳ جدول (۱)، آنالیز پره CM88Y بدست آمده از تخریب پره‌های توربین را به ترتیب، به دو روش ICP و کوانتومتری، بر حسب درصد وزنی ارایه می‌دهد. اما جدول (۲)، درصد وزنی دقیق عناصر هر دو گرید متفاوت آلیاژ CM88Y از شرکت اوکراینی زوریا، با حروف روسی، را ارایه می‌دهد [۳]. بررسی نتایج محققین نشان می‌دهد مقادیر جزیی از عناصر آلیاژی شبیه رنیم و یا نیتروژن می‌توانند در عمر خوردگی داغ این آلیاژ موثر باشند[۹]. از این رو جدول (۲) ارایه شده است تا بتواند منبع معتبری برای محققین علاقمند به آلیاژهای پایه نیکل روسی، باشد.

پس از تعیین ترکیب شیمیایی، پره‌های ردیف اول توربین زوریا، مطابق شکل (۱-ب) برش داده شد. نمونه‌های برش داده شده، برای آزمون‌های بررسی ریزساختار به کمک میکروسکوپ نوری و الکترونی، نشر میدانی FE-SEM مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است در داخل این پره، مجرای هواگرد برای خنک کردن آن تعبیه شده است و سطوح بیرونی پره به جز ریشه آن، دارای پوشش سد حرارتی زیرکونیا تقویت شده با ایتریا است.

جدول ۱- نتایج آزمون آنالیز شیمیایی برحسب wt.% روی پره‌های توربین با آلیاژ CM88Y و شرکت زوریا (درصد وزنی)

روش بازرسی	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Nb	V	C	B	Hf
محدوده استاندارد اوکراینی	15.4-16	BAL.	11.1-11.5	0.5	4.8-5.2	1.7-2	4.4-4.7	2.9-3.25	0.1-0.2	0.03	0.04-0.07	0.06-0.1	0.3
آزمون ICP-OES	16.36	57.5	10.9	0.22	4.82	1.86	4.01	3.76	0.24	<0.001	0.05	0.011	0.17
آزمون کوانتومتری	16.1	Base	11.6	0.07	4.72	1.71	4.5	2.85	<0.001	<0.005	0.05	-	-

جدول۲: ترکیب شیمیایی مستخرج از منبع سازنده پره توربین از آلیاژ CM88Y در دو گرید مختلف [۳]

Alloy grade	Chemical composition, %, not more →											
	C	Ni	Cr	Mo	W	Nb	Ti	Al	Co	Fe	Mn	Si
ХН57КВЮТМБЛУ-ВИ (ЧС88У-ВИ)	0,04-0,09	base	15,4-16,3	1,6-2,3	4,7-5,9	0,1-0,3	4,2-5,0	2,8-3,3	10,0-11,5	0,9	0,3	0,3
Supermet 88 Y (СМ-88У)	0,04-0,09	base	15,4-16,0	1,7-2,0	4,8-5,2	0,1-0,2	4,4-4,7	2,9-3,2	11,1-11,5	0,1	0,1	0,2

→ continuation	Chemical composition, %, not more											
	P	S	B	Zr	Hf	Al+Ti	Cu	Y	Ce	N	La	Mg
ХН57КВЮТМБЛУ-ВИ (ЧС88У-ВИ)	0,008	0,008	0,06-0,10	0,05	0,2-0.4	-	0,1	0,03	0,015	0,01	-	-
Supermet 88 Y (СМ-88У)	0,008	0,008	0,06-0,010	0,02-0,05	0,2-0,4	7,4-7,8	0,05	-	-	30ppm	-	50 ppm

این پره‌ها در منطقه گرم و خشک همراه با غبارهای فصلی کار می‌کرده و قسمت میانی ایرفویل پره‌ها، عموما دچار عیب تمرکز حرارتی با عیب Hot-Spot، قبل از پایان یافتن عمر خزشی خود (حدود ۳۵ هزار ساعت) می‌شوند. در تصویر شکل (۱-الف) این منطقه با فلش مشخص شده است.

لازم به ذکر است، پره توربین در شکل (۱)، از مدل ZORYA UGT25000-DU80L، با وزن حدود ۲۵۰ گرم است که دمای کاری آن تا حدود ۱۲۷۰°C در نیروگاه انتقال گاز است. سرعت زاویه‌ای آن ۵۰۰۰ rpm، دمای گاز ورودی قبل از ورود به توربین ۱۲۳۵ °C طراحی شده و توان اسمی آن MW۲۶ است.

بررسی‌های ظاهری و استریوگراف در این تحقیق نشان داد، عیب Hot-Spot، در وسط لبه حمله اکثر پره‌ها پس از ۱۰ هزار ساعت شروع می‌شود. در پره ۱۸۰۰۰ ساعت، عیب Hot Spot رخ داده است (فلش شکل ۱-الف) همانطور که دیده می‌شود در این عیب، پوشش سرامیکی ریزکانیا از بین رفته و سطح آلیاژCM88Y در معرض حرارت مستقیم قرار گرفت است. از این رو این منطقه به علت از بین رفتن پوشش سد حرارتی، تغییر ساختارفازی داده است. لذا در پژوهش حاضر، تلاش شد، ریزساختارفازی این منطقه؛ از پره ۱۸۰۰۰ ساعت کارکرد، در دمای ۱۲۷۰ ° C با ریزساختار فازی ریشه پره ۶۰۰۰ ساعت) مقایسه شود. زیرا ریشه پره مذکور، به علت نزدیک بودن به سیستم هواگرد و قرار داشتن در ریشه دیسک توربین، کمتر در معرض حرارت بوده است. در این پژوهش، علاوه بر مقایسه ساختار متالوگرافی و مقایسه سختی آنها، خواص کششی دمای محیط و خزشی با مقادیر استاندارد اوکراینی (یا نمونه غیر مستعمل) مقایسه شده است در این تحقیق برای آزمون متالوگرافی در تهیه و آماده سازی نمونه‌ها از استندارد ASTM E3-2017 و برای میکرو اچ از استاندارد ASTM E407-2015 و برای تهیه تصاویر متالوگرافی از استاندراد ASTM E883-2017 و برای فرایند الکتروپولیش از استاندارد ASTM E1558-2021 استفاده شده اما برای فرایند الکترواچ مطابق سند [۱۰] عمل شد. منتهی، برای انجام فرایند از محلول اچ شامل اسید فسفریک ۱۷۰ میلی لیتر، اسید سولفوریک ۱۰ میلی لیتر، اسید سولفوریک ۱۰ میلی لیتر، CrO_3 ۱۶ گرم استفاده شده و نمونه‌ها در این محلول در ولتاژ ۵ و زمان بین ۵ الی ۷ ثانیه الکترواچ شدند.. همچنین آزمون سختی طبق استاندارد ISO-6507، در مقیاس ویکرز انجام گرفت. آزمون کشش در دمای محیط برای نمونه‌های تخت در اندازه کوچک، طبق استاندارد ASTM A370-2021 انجام گرفت. همچنین آزمون خزش-پارگی کوتاه مدت، طبق استاندارد ASTM E139، انجام گرفت.

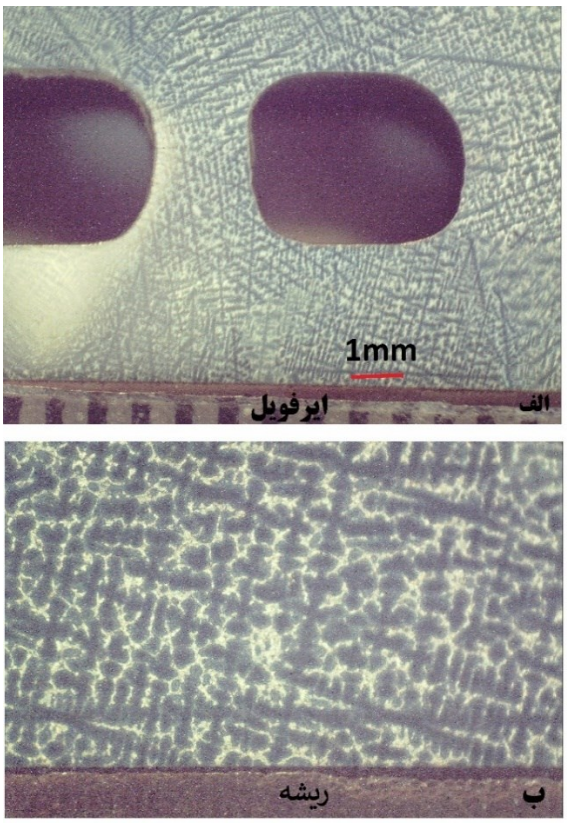
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار پره ۶۰۰۰ساعت

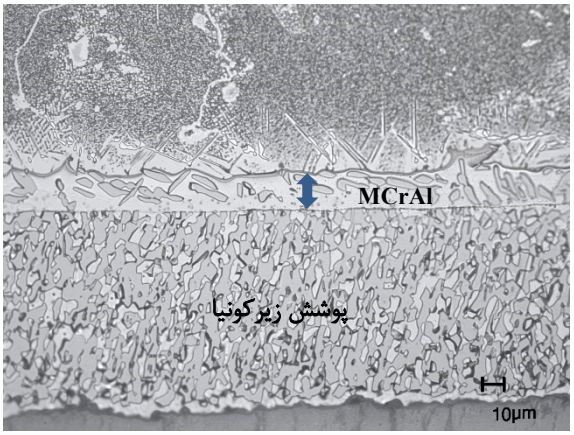
در ابتدا نمونه‌های از ریشه و مقطع عرضی ایرفویل پره ۶۰۰۰ ساعت، با واتر جت تهیه و پس از پولیش؛ مانت شد. در مرحله بعد، متالوگرافی نوری و الکترونی توسط میکروسکوپ الکترونی-نشرمیدانی انجام گرفت. در شکل (۲) تصاویر متالوگرافی ماکرواچ این نمونه‌ها ارایه شده است. ساختار دندریتی دراین نمونه‌ها کاملا مشخص است.

در شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب ساختارفازی، ایرفویل و ریشه پره ۶ هزار ساعت، پس از الکتروپولیش (مطابق دستور عمل در بخش روش آزمون)، در چند بزرگنمایی، توسط میکروسکوپ نوری، تهیه و ارایه شده است. در شکل (۳-الف)، تصویری از لایه سرامیکی زیرکونیا یا همان پوشش عایق حرارتی نشان داده شده است، در زیر این لایه عایق حرارتی، یک لایه نازکتر امکرالی (MCrAlY) وجود دارد (فلش آبی رنگ) که وظیفه اتصال نفوذی پوشش سرامیکی زیرکونیا و زمینه فلزی سوپرآلیاژی CM88Y را فراهم می‌آورد. در تصاویر شکل (۳-ب)، زمینه استنیتی، فازهای کاربیدی سفید رنگ به همراه یوتکتیک سل‌ها، در ایرفویل پره ۶ هزار ساعت مشخص شده اند. فازهای کاربیدی که با فلش در شکل (۳-ب) نشان داده شده است، با توجه به آنالیز EDS در مرجع [۵] علامت‌گذاری شده اند. همچنین در تصاویر شکل (۴)، ریزساختارهای فازی از ریشه پره ۶ هزار ساعت ارایه شده تا، ساختار قسمت‌های ریشه و لبه حمله ایرفویل همین پره، با هم مقایسه شوند.

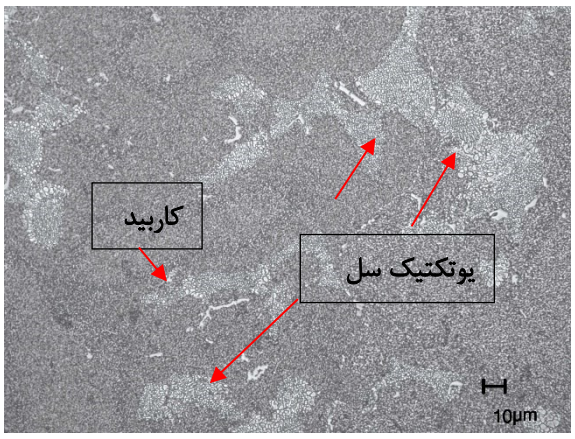
برای اینکه مشخص شود، ریزساختارهای فازی در پره‌های ردیف اول توربین زوریا، یک ریزساختار استاندارد (مطلوب)، مطابق دستور العمل سازنده اوکراینی پره، است، طبق سند سازنده، دو دسته ریزساختارفازی، به ترتیب شامل ریزساختار مطلوب در شکل (۵-الف) و (۵-ب)، و سپس ریزساختار مردود (دارای ذوب موضعی) در شکل (۵-ج) و (۵-د)، ارایه شده است [۳].شکل (۵-الف) ریزساختار مطلوب آلیاژ ریختگی CM88Y را نشان می‌دهد. شکل (۵-ب) ریزساختار مطلوب بعد از عملیات حرارتی آستنیته کردن، در دمای ۱۱۷۰ °C به مدت ۳،۵ ساعت در کوره خلاء، نشان می‌دهد. اما ریزساختارهای فازی شکل (۵-ج) و (۵-د)، به ترتیب، ریزساختارهای ریختگی و عملیات حرارتی مردود با ذوب موضعی (زمان یا دمای آستنیته کردن، بیش از مقدار مشخص شده در سند سازنده، بوده) را نشان می‌دهند [۳]. مقایسه تصاویر شکل‌های (۳) و (۴) با تصاویر ردیف بالای شکل (۵) نشان می دهد پره ۶ هزار ساعت در ریشه و ایرفویل، هر دو در محدوده استاندارد سازنده است و دچار تجزیه حرارتی خزشی نشده است.



شکل ۲: ماکرواچ ساختار دندریتی ریشه و ایرفویل پرهCM88Y توربین گازی

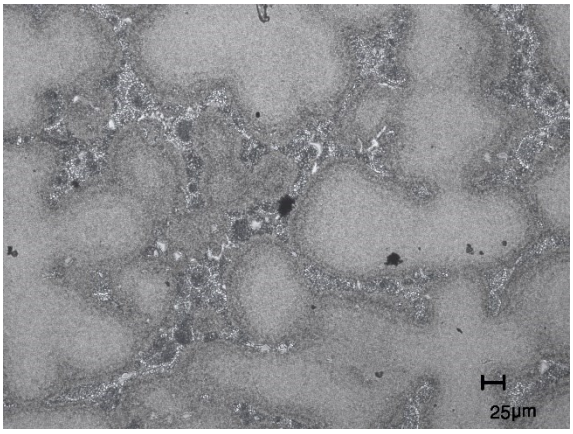


الف-X200

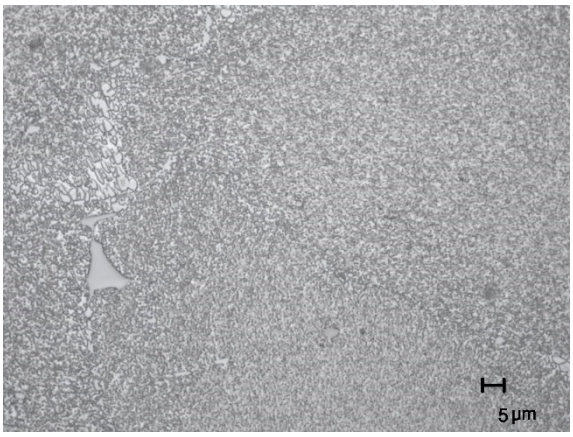


ب-X500

شکل ۳: متالوگرافی ایرفویل پره ۶ هزار ساعت در دو بزرگنمایی۲۰۰و ۵۰۰ برابر

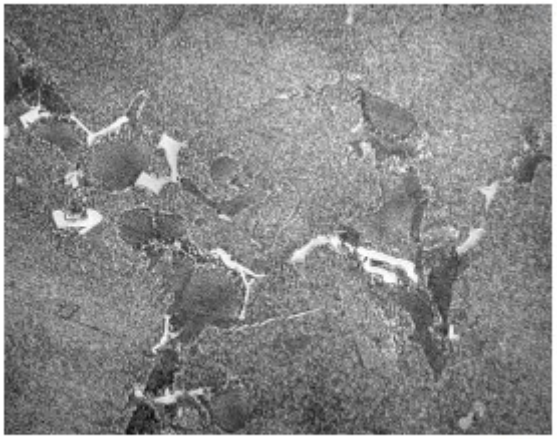


الف-X200



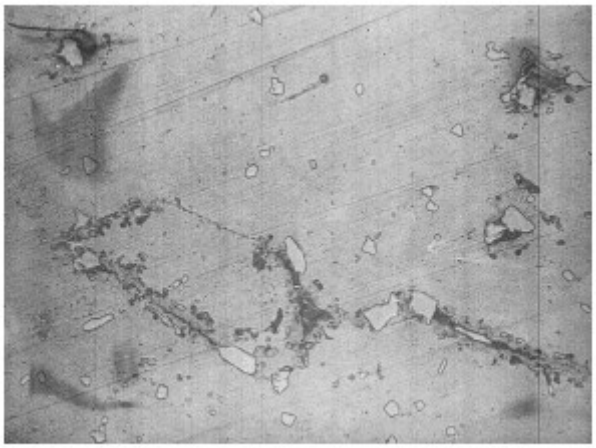
ب-X500

شکل ۴: متالوگرافی ریشه پره ۶ هزار ساعت در دو بزرگنمایی‌های مختلف



الف- ساختار مطلوب ریختگی

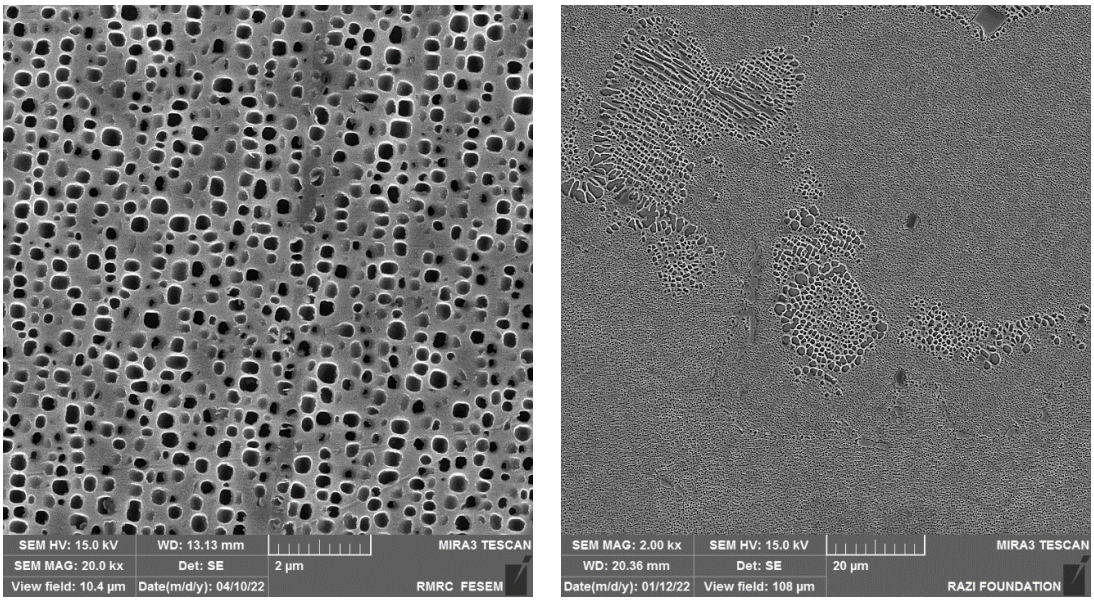
ب- ساختار مطلوب عملیات حرارتی



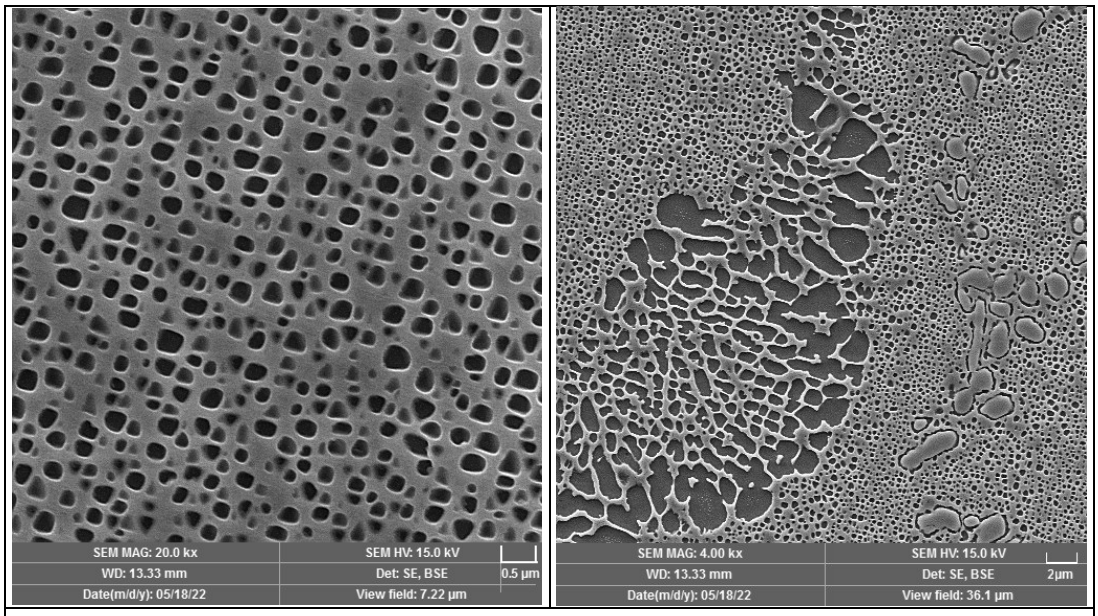
ج: ساختار ریختگی مردود

د: ساختار عملیات حرارتی مردود

شکل ۵: ساختار فازی سازنده زوریا اوکراینی برای پره ردیف اول توربین با آلیاژ CM88Y ، الف: مربوط ساختار تایید شده بعد از ریخته گری، ب: ساختار تایید شده بعد از استنیته در دمای $^{\circ}C$ ۱۱۷۰ به مدت ۳،۵ ساعت در کوره خلاء، ج و د: به ترتیب ساختار مردود ریختگی و عملیات حرارتی شد.



شکل ۶: ریزساختار ایرفویل پره ۶ هزار ساعت توسط میکروسکوپFE-SEM در دو بزرگنمایی



شکل ۷: ریزساختار ریشه پره ۶ هزار ساعت توسط میکروسکوپ الکترونیFE-SEM در دو بزرگنمایی

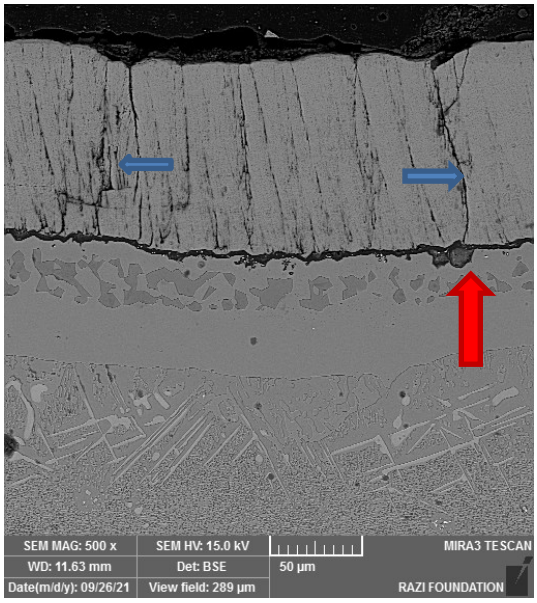
در شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب ریزساختار فازی پره ۶ هزار ساعت برای ایرفویل و ریشه پره مذکور، توسط میکروسکوپ الکترونی *FE-SEM* را نشان می‌دهند. دیده می‌شود که ریزساختار آلیاژ *CM88Y*، خصوصا فازهای گاماپرایم چهارگوش همچنان حالت خود را با فاصله مشخص از هم حفظ نموده‌اند و هیچ‌گونه حالت کروی شده یا در هم ادغام شده در این فازها رخ نداده است.

۳-۲- ریزساختار پره ۱۸۰۰۰ساعت

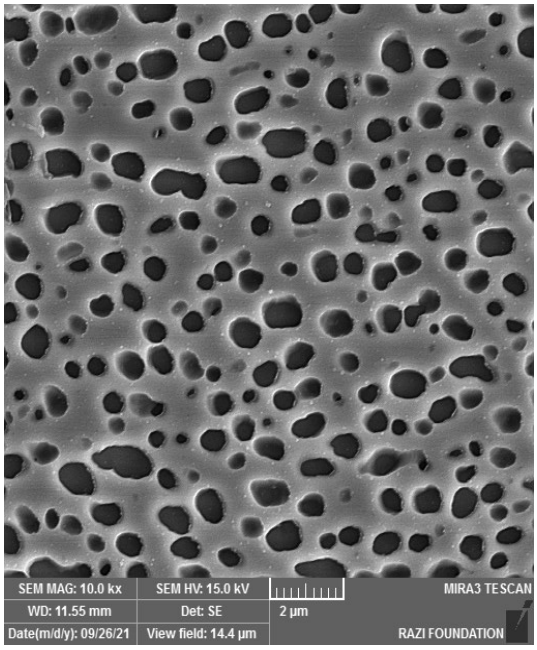
در ادامه از آنجایی که ساختارهای فازی بدست آمده توسط میکروسکوپ نوری برای تشخیص تجزیه حرارتی فازها و کاربیدها در کاهش عمر خزشی چندان مناسب نیستند، تلاش می‌شود، در این بخش، فقط تصاویر ریزساختارهای بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی *FE-SEM*، آن هم فقط برای قسمت ایرفویل پره ۱۸ هزار ساعت که احتمالا دچار خزش شده است، ارایه شوند.

ریزساختار برش مقطع عرضی ایرفویل پره ۱۸۰۰۰ساعت، در قسمت تمرکز حرارتی *(Hot-Spot)*، مطابق آنچه در شکل (۱) نمایش داده شده است، به کمک میکروسکوب الکترونی *FE-SEM* در شکل (۸) نمایش داده شده است. در شکل (۸-الف)، پوشش زیرکونیا، ترک عمودی خورده و باعث شده اتمسفر احتراقی اطراف پره از این ترک‌ها به قسمت *MCrAlY* زیرین،

برسد و شروع به پدیده اکسیداسیون داغ لایه فلزی *MCrAlY* کند. این نفوذ اکسیژن باعث شده، یک لایه اکسیدی حد فاصله بین پوشش زیرکنیا و لایه *MCrAlY* فلزی، به صورت یک ترک افقی سیاه رنگ ایجاد شود. با دقت در شکل (۸-الف)، بعضا اکسیدهای داغ کروی نیز در آن دیده می‌شود (فلش قرمز روی شکل مشاهده شود). درشکل (۸-ب)، مورفولوژی فازهای گاما پرایم، نیز تغییر نموده است. در تصاویر مذکور دیده می‌شود که فازهای گاما پرایم، بعضا در هم ادغام و درشت شده اند.

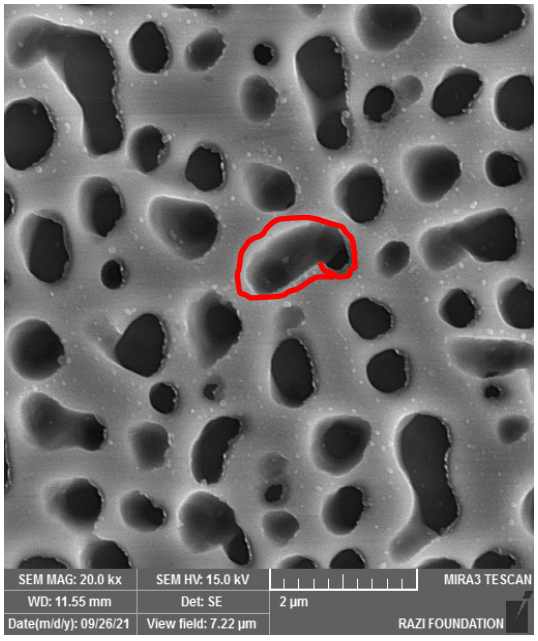


الف:

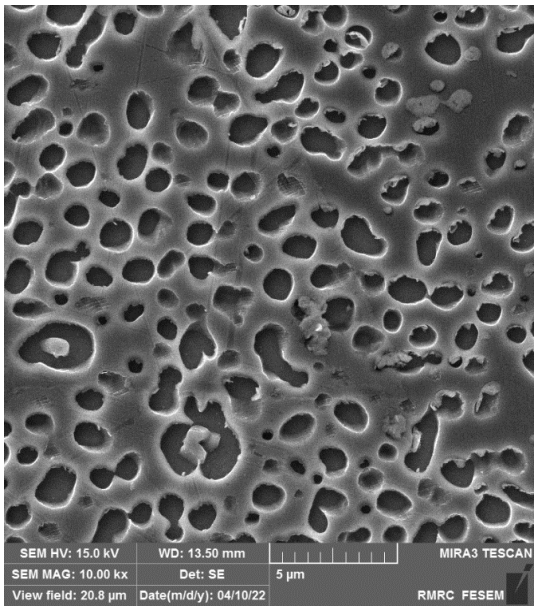


ب

شکل۸: ریزساختار فازی منطقه اطراف عیب *hot spot* وسط لبه حمله پره توربین در دو بزرگنمایی



الف:



ب

شکل ۹: ریزساختار فازی گاماپرایم اولیه و ثانویه در محل hot-spot پره ۱۸ هزار ساعت در دو بزرگنمایی

برای وضوح بهتر پدیده درشت شدن فازهای گاماپرایم، کمی نزدیک به منطقه *Hot-spot* بزرگنمایی و در شکل (۹) ارایه شده است. در تصاویر شکل (۹-الف) و (۹-ب)، به خوبی دیده می‌شود که فازهای چهار گوش گاماپرایم به حالت کروی تا بیضوی تبدیل شده و تعدادی از انها نیز به هم پیوسته‌اند. هنگامی گه دو فاز گاماپریم اولیه بیضی شگل به هم رسیده و در هم ادغام شوند، حالت لوبیایی شکل، همانند منحنی قرمز مشخص شده در شکل (۹-الف)، به خود می‌گیرند.

نتیجه‌گیری که از مقایسه ریزساختار پره توربین ۱۸۰۰۰ ساعت با ۶۰۰۰ ساعت و همچنین ساختار استانداردِ سازنده اوکراینی،

می‌توان گرفت، این است که در منطقه Hot-spot پره‌های ردیف اول توربین، به علت از بین رفتنِ پوشش عایق زیرکونیا، آلیاژ CM88Y در معرض حرارت زیاد قرار گرفته و شروع به تجزیه شدن در اثر پدیده نفوذ جرمی می‌کند. همه این عوامل نشان از کاهش عمر خزشی آلیاژ CM88Y در این منطقه است. سایر مناطق به علت حفظ پوشش عایق حرارتی زیرکونیا، ساختار استاندارد خود را حفظ نموده‌اند.

۴- بررسی خواص مکانیکی

۴-۱- آزمون سختی

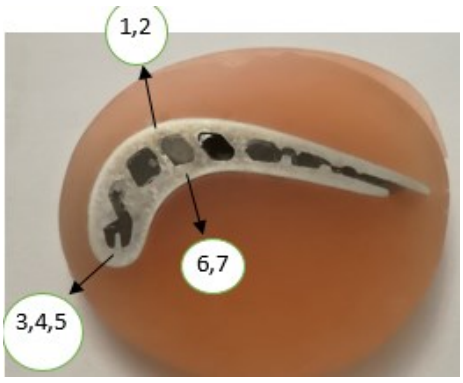
جدول (۳) نتایج ازمون سختی در مقیاس ویکرز برای دو نمونه ۶۰۰۰ و ۱۸۰۰۰ ساعت را در لبه حمله، سطح مکش و سطح فشار، نشان می‌دهد. در منطقه‌ای که پوشش زیرکونیا از بین رفته است، سختی افت نموده و حتی به ۳۲۰ ویکرز رسیده است. مقادیر سختی‌ها در شکل (۱۰)، برای مقایسه بهتر در کنار همدیگر، رسم شده است.

لازم به ذکر است در سند سازنده اوکراینی اشاره‌ای به سختی مجاز پره توربین نشده است. تنها به خواص مکانیکی دما محیط، دمای بالا و خزشی آلیاژ *CM88Y* اشاره شده است. زیرا خواص سطحی و موضعی معیار پذیرش یا مردود شدن پره نیست.

۴-۲- آزمون کشش در دمای محیط

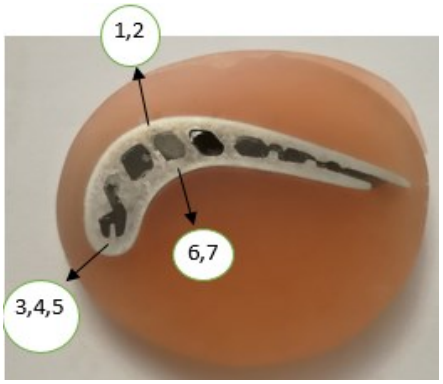
تهیه نمونه کشش از پره‌های توربین زوریا به علت داشتن سیستم هواگرد وسیع، بسیار سخت است، زیرا ضخامت آنها کمتر از ۳ میلیمتر است. از این رو از قسمت فشار پره‌ها، به کمک اره کمان دستی و جریان مایع خنک کننده؛ نمونه‌های کوچک تخت، بعد از ساعت‌ها برشکاری آرام، بدون گرم شدن نمونه، تهیه شد. سپس آزمون کشش در دمای محیط، طبق استاندارد *ASTM E8*، روی سه نمونه نو، ۶۰۰۰ و ۱۸۰۰۰ ساعت انجام گرفت. لازم به ذکر است که نمونه نو (کارنکرده) میله‌ای از آلیاژ *CM88Y* است که از محصولات شرکت توگا بوده است. نتایج این آزمون در شکل (۱۱) ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تنش تسلیم نمونه ۱۸ هزار ساعت نسبت به نو، افت داشته است که حکایت از رخداد پدیده پیرسازی بیش ازحد، دارد. همچنین کاهش ازدیاد طول نسبی در شکل (۱۲) نیز نشان از همین مطلب است. باید یادآوری شد نمونه نو از پره توربین تهیه نشده و از میله‌ای از الیاژ *CM88Y* غیر مستعمل، تهیه شده است و آزمون کشش نیز با مقطع گرد (نه تخت) بوده و شاید این اختلاف خواص نمونه غیر مستعمل، نسبت به نمونه ۶ هزار ساعت مستعمل، به همین علت باشد.

جدول ۳: سختی ایرفویل ۶۰۰۰ و ۱۸۰۰۰ ساعت در مقیاس ویکرز طبق استاندارد ISO6507



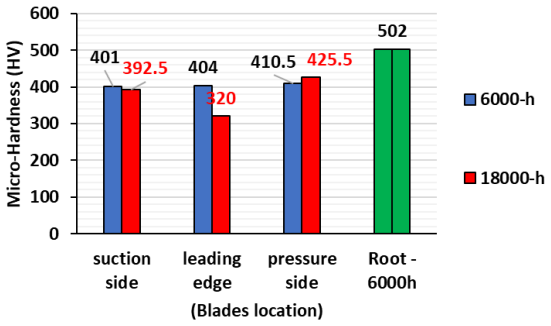
۶۰۰۰ساعت

Method	Average	Hardness	No.
$HV_{0.1}$	401	413	1
		389	2
	404	407	3
		405	4
		400	5
	410	414	6
		407	7

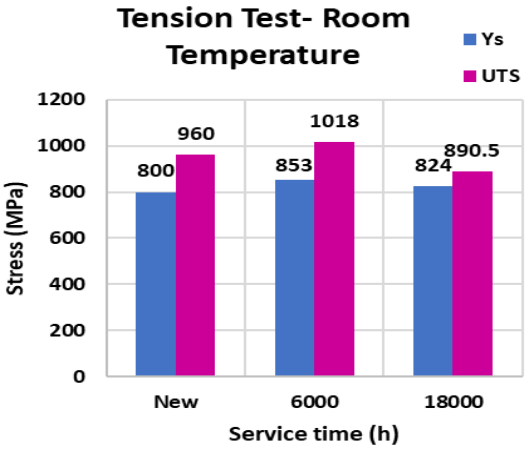


۱۸۰۰۰ساعت

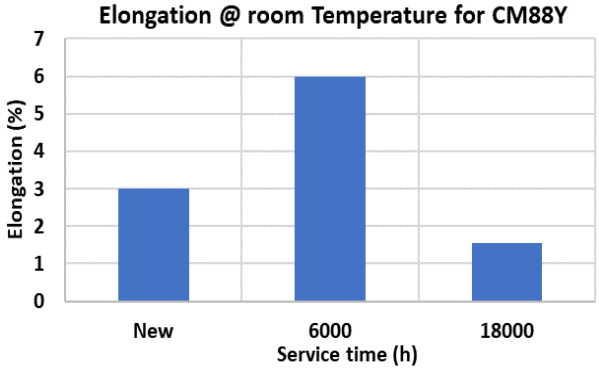
Method	Average	Hardness	No.
$HV_{0.1}$	392.5	394	1
		391	2
	320	342	3
		300	4
		318	5
	425.5	427	6
		424	7



شکل ۱۰: تغیرات متوسط سختی‌های بدست آمده از جدول ۳



شکل ۱۱: مقایسه استحکام تسلیم و نهایی بین سه نمونه نو، ۶ و ۱۸ هزار ساعت



شکل ۱۲: مقایسه ازدیاد طول نسبی بین سه نمونه نو، ۶ و ۱۸ هزار ساعت

۳-۴- آزمون خزش- پارگی

آزمون خزش پارگی زیر ۲۰۰ ساعت طبق استاندارد، روی سه نمونه نو زوریا، نمونه ۶ و ۱۸ هزارساعت درشرایط ارایه شده توسط کمپانی اوکراینی، یعنی دمای ۹۰۰ °C و تنش ۲۴۷ MPa.، انجام گرفت. طبق اطلاعات جدول (۴) که از سازنده اوکراینی بدست آمده است، زمان پارگی در این شرایط، باید حداقل ۱۰۰ ساعت باشد [۳و۵]. نتایج این آزمون، طبق استاندارد ASTM E139 در شکل (۱۳) ارایه شده است

جدول۴: شرایط آزمون خزش-پارگی طبق استاندارد سازنده اوکراینی [۳]

Alloy grade	Creep rupture test		
	Test temperature, K (°C)	Stress,G , MPa, (kgf/mm^2), not less	Time till de-struction, hours, not less
ХН57КВЮТМБЛУ-ВИ (ЧС88У-ВИ) Supermet 88Y (CM-88Y)	1173 K (900 ± 4)	274 (28)	100

آزمون خزش مربوط به پره‌های ۶ و ۱۸ هزار ساعت، چون از سطح بیرونی یا سطح فشار پره، نمونه تهیه شده اند اندکی انحنا داشته لذا علت اصلی شکست زودتر نمونه ۶ هزار ساعت، تهیه نمونه بوده است، نه مقاومت ساختار آن، از اینرو قسمت ناحیه اول و ابتدای ناحیه ثانویه نمودار خزش؛ مطابق شکل (۱۳-الف)، قابل مقایسه هستند. این مطلب در شکل (۱۳-ب)، به خوبی بزرگنمایی و نشان داده شده است

در شکل (۱۳-ب)، دیده می‌شود در یک مدت زمان خزشی ثابت، نرخ کرنش خزشی نمونه ۱۸ هزار ساعت از همه بیشتر است و این رفتار تا نزدیک ۱۰۰ ساعت (قبل شکست نمونه ۶ هزارساعت) ادامه دارد. لذا با توجه به ساختارفازی تجزیه شده نمونه ۱۸ هزار ساعت، می‌توان گفت رفتار خزشی نیز، با این ساختار فازی همخوانی دارد. در ادامه برای ارزیابی افزایش دما یا سطح تنش روی پره ۱۸ هزار ساعت، تلاش شد با تخریب چهار پره دیگر، از ردیف اول توربین، آزمون‌های خزش- پارگی کوتاه مدت، در دماها و تنش‌های بالاتر و پایین تر (از مقدار استاندارد جدول ۴)، انجام گیرد. نتایج آزمون‌های خزش روی پره‌های ۱۸ هزار ساعت در شکل (۱۴) همراه باشرایط دمایی و تنشی ارایه شده است. داده‌های بدست آمده از این آزمون، در جدول (۵) ارایه شده است. به کمک این داده‌ها می‌توان، نمودار لارسون میلر را رسم و معادله تغییرات تنش با پارامتر لارسون-میلر، یعنی معادله ۱، را بدست آورد. با توجه به داده‌هایی که از منابع اوکراینی [۴] و شرکت دانش بنیان علوم و فناوری‌های نوین رهیافت [۸]، بدست آمد، مقدار عددی پارامتر P در ستون آخر جدول (۵)، به کمک معادله ۲، تکمیل شده است [۵،۳].

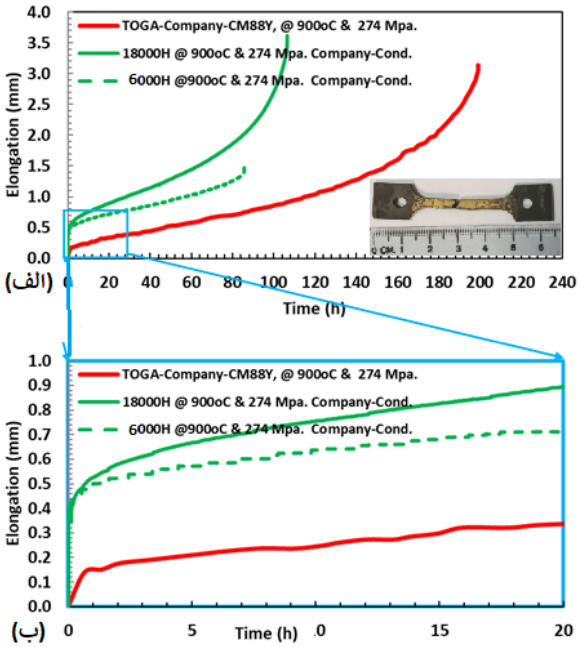
$$\sigma=-0.0105*LMP^2+0.4006LMP-0.8966 \quad (۱)$$

$$LMP=(T+273)(C+\log(t)) \quad (۲)$$

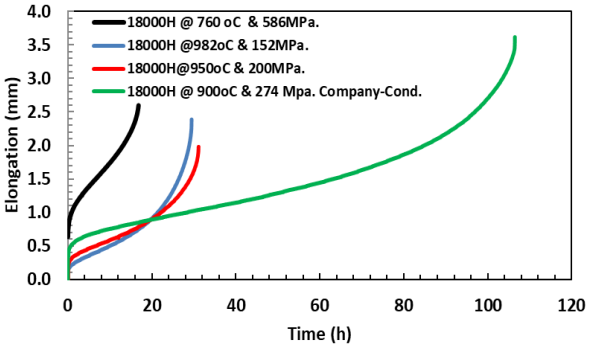
در روابط فوق، σ: مقدار تنش بر حسب MPa. و T: دما به سلسیوس، t: زمان به ساعت و $C=20$ مقدار ثابت لارسون-میلر برای آلیاژ $CM88Y$ است. در شکل (۱۵) تصویری از منحنی لارسون میلر، مربوط به اسناد سازنده اوکراینی ارایه شده است.

جدول ۵: داده‌های بدست آمده از شکل ۱۵ و پردازش آنها

Service Time (h)	Stress(MPa)	Temperature℃	Time(h)	Log(Stress)	P
18000	274	900	106.45	2.4377506	25.83784
	200	950	31.04	2.30103	26.28462
	152	982	29.42	2.1818436	26.94315
	586	760	16.81	2.7678976	21.92601

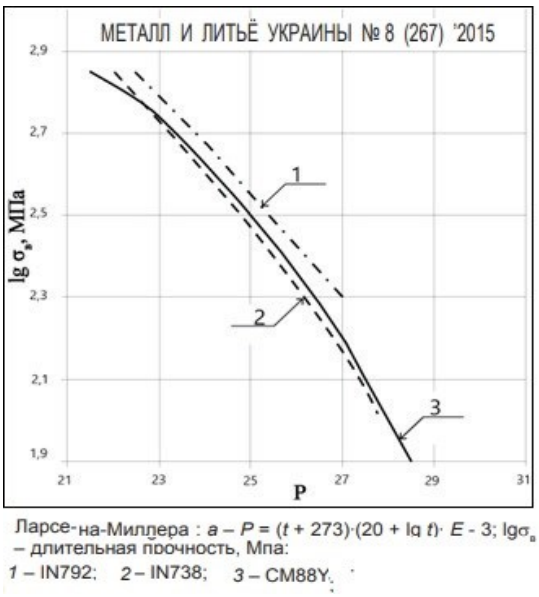


شکل ۱۳: نتایج ازمون خزش-پارگی روی سه نمونه نو، ۶ و ۱۸ هزارساعت آلیاژCM88Y پره اول توربین



شکل ۱۴: نتایج ازمون خزش-پارگی روی پره ۱۸ هزار ساعت در سطح تنش‌ها و دماهای متفاوت برای تعیین عمر

با توجه به داده‌های جدول (۵) و شکل (۱۵)، داده‌های جدول (۶) تهیه شده‌اند. به کمک این داده‌های که شامل داده‌های عمرخزشی اندازه گیری شده در آزمایشگاه مرجع، در کنار شرایط حداقل و حداکثر عمر خزشی به کمک منحنی شکل (۱۵) است می‌توان عمر خزشی را برای ردیف دوم جدول (۶) که زمان پارگی آن زیر حداقل مقدار مجاز استاندارد است را بدست آورد. این نمونه از کنار منطقه *Hot-Spot* پره توربین استخراج شده است.



Ларсе-на-Миллера : $a - P = (t + 273)\cdot(20 + \lg t)\cdot E - 3$; $\lg\sigma_a$ – длительная прочность, Мпа:
1 – IN792; 2 – IN738; 3 – CM88Y.

شکل۱۵: منحنی لارسون-میلر الیاژCM88Y [۴ و ۸]

جدول ۶: نتایج آزمون پارگی مطابق اطلاعات شکل ۱۴

کد	تنش (MPa)	دما (°C)	زمان محاسباتی		زمان آزمون پارگی (h)
			زمان حداقل (h)	زمان حداکثر (h)	
18000h	274	900	55.16	120	106.45
18000h	152	982	39.30	56.93	29.42
6000h	274	900	55.16	120	85.99

برای نمونه پره ۱۸ هزار ساعت در شرایط دمای ۹۸۲ °C و سطح تنش ۱۵۲ *MPa*، پدیده پارگی پس از ۴۲/۲۹ ساعت رخداده است. لذا از کمترین زمان استاندارد آن (یعنی ۳۹ ساعت بر اساس شکل ۱۵) هم کمتر است. به علت قرار داشتن آلیاژ *CM88Y* در رژیم خزشی در شرایط (۱۵۲*MPa*. و دمای ۹۸۲ °C) آنالیز تعیین عمر خزشی برای این پره به شرح زیر انجام گرفت:

$$152MPa \rightarrow Avg.curve \rightarrow LMP1 = 27.3030$$
$$152MPa \rightarrow Min.curve \rightarrow LMP2 = 27.0101$$
$$LMPi*1000 = (273+^{o}C)(20+\log(t))$$
$$27303.0 = (273+982)(20+\log(t_1)) \Rightarrow t_1 = 56.9350h$$
$$27101.0 = (273+982)(20+\log(t_2)) \Rightarrow t_2 = 39.3027h$$

با توجه به اینکه زمان پاره شدن نمونه در آزمون خزش زیر مقدار حداقل زمان محاسباتی است، باید *LMP* تصحیح شود. زیرا آلیاژ دچار خزش شده است و بایستی میزان کاهش ΔLMP آن را بدست آورد:

$$LMP_1 = (273+982)(20+Log(29.42)) = 26.94$$
$$LMP_2 : \sigma = 152\ MPa \rightarrow Min.\ curve larson-miller \Rightarrow$$
$$LMP_2 = 27.01$$
$$\Delta LMP = 27.01 - 26.94 = 0.07 \quad h.^oC$$

در قدم بعدی بایستی، تنش سرویس را به کمک نتایج شبیه‌سازی یا محاسباتی، تعیین نمود. سپس این تنش را روی نمودار لارسون-میلر آلیاژ CM88Y برده و LMP شرایط سرویس را بدست آورد و درنهایت این مقدار را باید تصحیح نمود. به این صورت که مقدار افت ΔLMP را از مقدار مذکور، کم کرد.
در این مرحله، به کمک معادله ۳ و شبیه‌سازی عددی، مقدار تنش و دمای عملیاتی با توجه به وزن ۲۵۰ g پره، سرعت دوران ۹۵۰۰ rpmو دانسیته ۸۱۰۰ g/cm^3 این آلیاژ تا نقاط *Hot-Spot* روی لبه حمله، به بدست آمد [۵]:

$$F = \rho\omega^2 \int_{r_1}^{r_2} A.r.dr;$$
$$\omega = \frac{rpm.2.\pi}{60};$$
$$r_1 = 387,$$
$$r_2 = 439\ mm,$$
$$rpm = 9500 \qquad (۳)$$

در این رابطه A سطح مقطع پره در هر شعاع دلخواه است. با توجه به اینکه طول پره مورد نظر حدود ۱۰۳ میلی‌متر است (ریشه آن ۳۰ میلی‌متر) مقدار تنش کاری تا مقطع‌ای که عیب Hot-spot رخداده است، حدود ۱۷۰ MPa. در بدترین شرایط و دمای سرویس نعیین شد. لذا با قبول تنش ۱۷۰ MPa. برای تنش الاستیک مجاز در دمای سرویس ۸۶۰ °C، محاسبات طول عمر به کمک پارامتر لارسون-میلر انجام‌گرفته است [۸].

$$LMP_{new} = LMP_e - \Delta LMP$$

$$170MPa \rightarrow Min.\ Larson-miller\ curve.$$
$$\rightarrow LMP_e = 26.79\, h.^oC$$

$$LMP_{new} = 26.79 - 0.07 = 26.72 \quad h.^oC$$

$$26720 = (273+860)(20+Log(t)) \Rightarrow$$
$$t = 3832\ h$$

حال می‌توان زمان عمر باقیمانده خزشی این آلیاژ را در شرایط سرویس ۱۷۰ *MPa.* و دمای ۸۶۰ °C حدود ۳۸۰۰ ساعت تخمین زد. لذا، پره‌های ۱۸ هزار ساعت دچار پدیده خرش شده اند و از عمر آن‌ها حدود ۵ ماه (۳۸۰۰ ساعت) بیشتر، باقی نمانده است. این مطلب با آنالیز ریزساختارهای فازی بدست آمده از تصاویر *FE-SEM* پره ۱۸ هزار ساعت؛ در ناحیه *Hot-Spot*، هم‌خوانی کامل دارد. زیرا فازهای گاما پریم اولیه کاملاً گرد یا بیضوی شده و تعداد زیادی از آنها مطابق تصاویر الف، ب، از شکل (۹) به همدیگر پیوسته‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های مخرب روی پره ردیف اول توربین زوربا اوکراینی از آلیاژ نیکل-کبالت مقاوم به حرارت با نام *CM88Y* نشان می‌دهد:

۱- پره‌ها به علت شرایط سرویس نامطلوب دارای عیب Hot-spot بوده‌اند و در این مناطق پوشش سد حرارتی زیرکونیا از بین رفته و حرارت بیش از حد مجاز به زمینه فلزی رسید و باعث تجزیه حرارتی آن در این مناطق شده است.

۲- در پره ۱۸ هزارساعت، نتایج نشان داد که فازهای مکعبی گاما پرایم اولیه در اثر این حرارت بیش از حد به صورت مورفولوژی کروی تا بیضی در آمده اند و تعداد زیادی از آنها رشد و در هم ادغام شده اند. این ساختار مشخصه افت عمر خزشی است.

۳- نتایج سختی‌سنجی نشان داد که سختی منطقه Hot-spot، شدیداً نسبت به سایر مناطقی که پوشش سد حرارتی از بین نرفته بود، افت نموده است.

۴- نتایج آزمون کشش نمونه ۱۸ هزارساعت نسبت به نمونه ۶ هزار ساعت نیز افت داشته است. همچنین نمونه ۱۸ هزار ساعت نسبت به مقدار مجاز استاندارد اوکراینی، افت داشته است.

۵- آزمون خزش-پارگی کوتاه مدت، طبق استاندارد ASTM E139، نشان داد نمونه ۱۸ هزار ساعت، حدود ۳۸۰۰ ساعت بیشتر عمر خزشی نداشته و در این شرایط کاری به علت رخداد پدیده Hot-spot، دچار خزش شده و بایستی تعویض شود.

مراجع

[1] Kvasnytska I.H., Improving the performance of working blades of modern industrial gas turbine engines, Metals and Casting of Ukrain, 2015, 8(267) 29-31.
[2] Kvasnytska I.H. , Increase of operational characteristics of Nickel-based superalloys and development of a complex alloying technology for producing GTE blades, PhD Thesis, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 2018.
[3] Zorya M., Heat resistant alloy castings made by vacuum poring, Technical Report, Nikolaev, Ukraine, 2008.

[4] Y.G. Kvasnitskaya, Performance improvement rotor blades of modern industrial turbines gas turbine engines, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Metal and Casting of Ukraine, 2015, 267(8) 29

[۵] نجمی م.، میرباقری س.م.ح.، صالحی ع.، تحقیقات برای ریشه‌یابی خرابی (RCA) علل خرابی‌های پره‌های توربین‌های ZORYA UGT25000-DU80 در سایت سراجه‌ی، گزارش معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شماره:۲۰۳۱۰/د، شهریور ۱۴۰۱.

[۶] گرجی م.، بررسی اثر تغییر سرعت سرمایش از دمای عملیات انحلالی بر ریزساختار، خواص کشش گرم و رفتار خزشی سوپرآلیاژ پایه نیکل CM88Y، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۴.

[7] Kablov E.N., Toloraiya V.N., Orekhov N.G., Single-crystal nickel rhenium-containing alloys for turbine blades, Metal Science and Heat Treatment of Metals, 2002, 7, 2-5.

[۸] شرکت علوم و فناوری نوین رهیافت، گزارش تعیین عمر خزشی پره‌های HP توربین گازی GE، شرکت پتروشیمی پارس عسلویه، ۱۳۹۵.

[9] Jiarong L.I., Dingzhong T., Riling L., Shizhong L., Zhongtang W., Effects of Rhenium on creep rupture life of a single crystal superalloys, Journal of Material Science and Technology, 1999, 15(01) 53-57.

[10] Electro-Chemical Etching User Guide and Accessories Catalogue, No: ENG099, Issue 1.5 Mar 2017.

IRANIAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Microstructure Characterization and Creep Behavior on the Casting CMM88Y Super Alloy turbine Blade

Mohammad Najmi [1], Seyed Mohammad Hossein Mirbagheri [* 2], Ali Salehi [3]

1. Ph.D. Student, in Materials Science and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran,
2. Associate Professor, Materials Science and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran
3. Engineer, Iranian Gas Transmission Company, I.G.T.C.,

* Corresponding author, smhmirbagheri@nit.ac.ir

Paper history:
Received: 28 March 2023
Accepted: 09 May 2023

Keywords:
Casting CM88Y alloy,
Creep, Hot spot,
Stress,
Larson-Miller,
Characterization,
Microstructure.

Abstract:
In this study, the mechanical properties of gas turbine blades are investigated by investment casting method. These Nickel-based alloys blades, with standard name, CM88Y, are made in Ukraine. Currently, these blades are used in Zorya brand gas turbines in most power plants in Iran. Therefore the technical information about this alloy are very limited. In this investigation, the CM88Y Nickel base alloy as a Ni-Co heat resistant super-alloy was assessed by a lot of destructive tests. Mechanical and creep properties as well as the phase microstructure for a turbine blade were measured after 6000 and 18,000 hours. The creep results by adding Larson-Miller parameter, revealed that the 18,000-hour blade with the hot-spot zone defect has a creep life less than 3,800 hours due to the TBC erosion and hot-spot defect. Also, the gamma prime phase has changed from a cubic morphology to a spherical shape associated to the coarsening phenomenon.

Please cite this article using:
Mohammad Najmi, Seyed Mohammad Hossein Mirbagheri, Ali Salehi, Microstructure Characterization and Creep Behavior on the Casting CMM88Y Super Alloy turbine Blade, in Persian, Founding Research Journal, 2021, 6(2) 113-124.

DOI: 10.22034/FRJ.2023.391115.1177

Journal homepage: www.foundingjournal.ir