

Evaluation of microstructural changes of Rene-80 super alloy turbine blades of J85 engine by non-destructive Eddy current method

Hamidreza Zarei¹  | Mohammad Rezaei² 

1. Aerospace Science and Technology Shahid Sattari University, Tehran, Iran. E-mail: zarej@ssau.ac.ir
2. Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran. E-mail: Mohammadre4302@gmail.com

Article Information:

Research Article

Received 30 June 2023

Revised 25 August 2023

Accepted 1 February 2024

Keywords:

nickel-based super alloy,
Turbine blade,
microstructural changes,
non-destructive test,
Eddy current.

ABSTRACT

Nowadays, flying objects' engines are harmed and malfunctioning due to the aging phenomenon. One of the most important problems lies in the hot part of these engines. Turbines of these engines have creep and metallurgical difficulties which lead to cracks and part failure. In case of one engine blade failure, the whole engine will be out of operational line. Thus, proposing a method for aging determination and prolonging the lifetime of these engine' parts can play a significant role in keeping the military helicopters of the country continuously operating. In this study, Eddy current non-destructive method was utilized to evaluate the microstructural changes of the Rene80 superalloy turbine blades of the J85 engine. The microstructural changes that occurred in this sample by the aging phenomenon at a temperature above 800 °C for 1600 h under service were studied through destructive and non-destructive routes. To this end, changes in 4 turbine blade parts that were under service for the same periods of time were compared together as well as with an intact blade sample (as the control sample). Metallography studies, scanning electron microscopy (SEM), EDS element analysis, and microhardness tests were done to assess microstructural changes, destructions, and phase characterizations. It was found that there was a good correspondence between the results obtained from destructive studies and Eddy current evaluations. The results show that the volume fraction and grain size of the precipitates of the under-service samples were considerably increased compared to the intact specimen and the morphology of γ precipitates was transformed from cubic to spherical shape. Likewise, the hardness of the under-service samples was decreased compared to the intact ones. The Eddy current results show that the impedance amount of the under-service samples was decreased compared to the control which is in correspondence with the hardness test results. The induction resistance parameter in the Eddy current test closely correlates with hardness test results ($R^2=0.95$). Altogether, it can be concluded that Eddy's current non-destructive method is capable of separating different samples of this superalloy and distinguishing microstructural changes.

Cite this article: Zarei, H., Rezaei, M. (2024). Evaluation of microstructural changes of Rene-80 superalloy turbine blades of J85 engine by non-destructive Eddy current method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 1-12. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.404780.1122>

بررسی تغییرات ریزساختاری پره توربین موتور J85 از جنس سوپرآلیاژ Rene80 به روش غیرمخرب جریان گردابی

حمیدرضا زارعی^۱، محمد رضایی^۲

۱. دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، رایانامه: zarei@ssau.ac.ir

۲. دکتری، فناوری‌های نوین، دانشگاه مالک اشتر، تهران، رایانامه: Mohammadreza4302@gmail.com

چکیده:

امروزه موتور وسایل پرنده به علت عمر بالا دچار آسیب‌های مختلفی شده و عملکرد آن‌ها را مختل نموده است. یکی از مهم‌ترین مشکلات در بخش گرم این موتورها می‌باشد. توربین این موتورها دچار مشکلات خزشی و متالوژیکی شده و دچار ترک خوردگی و شکست می‌شوند. در اثر شکست یک پره کل موتور از رده عملیاتی خارج می‌شوند. از این رو، استفاده از روشی به جهت تعیین پیری و عمر دهی این بخش از موتورها می‌تواند نقش به‌سزایی در عملیاتی نگه داشتن بالگردهای نظامی کشور داشته باشد. در این پژوهش از روش غیرمخرب جریان گردابی برای بررسی تغییرات ریزساختاری پره توربین موتور J85 با کاربرد نظامی از جنس سوپر آلیاژ Rene80 استفاده شده است. تغییرات ریزساختاری اتفاق افتاده در اثر پدیده پیری در این نمونه که در دمای بالای 800°C برای مدت زمان ۱۶۰۰ ساعت تحت شرایط سرویس قرار داشته، به صورت مخرب و غیرمخرب مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، تغییرات چهار قطعه پره توربین که در مدت زمان یکسان تحت سرویس قرار داشته‌اند با یکدیگر و با یک نمونه پره سالم (به عنوان نمونه شاهد) تحت مقایسه قرار گرفته است. به منظور بررسی تغییرات ریزساختاری، از روش‌های متالوگرافی و تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی، آنالیز عنصری EDS و محاسبات درصد فاز و ریز سختی سنجی استفاده شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که کسر حجمی و اندازه رسوبات نمونه‌های تحت سرویس نسبت به نمونه سالم به میزان قابل توجه‌ای افزایش یافته است و مورفولوژی ذرات رسوبی γ از حالت مکعبی به کروی متمایل شده است. همچنین، سختی نمونه‌های تحت سرویس نسبت به نمونه سالم کاهش یافته است. در ادامه، آزمون جریان گردابی نیز به منظور مشخصه‌یابی غیرمخرب بر روی قطعات انجام شد. نتایج آزمون جریان گردابی نشان می‌دهد که مقدار امپدانس نمونه‌های تحت سرویس نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است که این کاهش در نتایج سختی سنجی نیز مشاهده شد. همچنین، ارتباط خطی مناسبی با ضریب همبستگی مطلوب ($R^2=0.95$) میان تغییرات خروجی آزمون جریان گردابی یعنی مقاومت القایی با نتایج سختی سنجی مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از آزمون غیرمخرب جریان گردابی، توانایی ایجاد تفکیک میان نمونه‌های مختلف این سوپرآلیاژ و تشخیص تغییرات ریزساختاری را دارا می‌باشد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۴/۰۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۱/۱۲

کلیدواژگان:

سوپر آلیاژ پایه نیکل، پره توربین، تغییرات ریزساختاری، آزمون غیرمخرب، جریان گردابی.

استناد: زارعی، حمید؛ رضایی، محمد. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات ریزساختاری پره توربین موتور J85 از جنس سوپرآلیاژ Rene80 به روش غیرمخرب جریان گردابی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۳)، ۱-۱۲. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.404780.1122>

۱- مقدمه

بالا و ثبات ریزساختار سوپر آلیاژ پایه نیکل وابسته به توزیع فاز γ' ، اندازه ذرات و کسر حجمی آن می‌باشد [۴]. آقایی و همکارانش [۵] گزارش دادند که افزایش کسر حجمی این فاز در ریزساختار سوپر آلیاژ پایه نیکل یک دلیل مهم برای داشتن استحکام و خواص مکانیکی مطلوب در دمای بالا می‌باشد. در پژوهشی دیگر مرادی و همکارانش [۶] به بررسی تاثیر عملیات حرارتی فوق پیرسختی بر ساختار سوپر آلیاژ Rene80 پرداختند. مشاهده شد که اعمال سیکل عملیات حرارتی فوق پیرسختی منجر به تغییر شکل ذرات گاما پرایم از حالت مکعبی در ساختار ریختگی به حالت کروی شده است. که این تغییر در مورفولوژی باعث افت خواص مکانیکی نمونه شده است.

با توجه به عمر بالای ناوگان بالگردی هوانیروز نزاجا، امروزه مشکلات مختلفی در بخش موتور آن پدیدار شده است. یکی از مشکلات عمده در بخش گرم موتورهای جت می‌باشد. قطعات در این بخش از موتور به علت دمای کاری بالا دچار پیری و مشکلات خزشی خواهند شد که ارزیابی متالورژیکی آن‌ها به صورت سنتی به روش مخرب انجام می‌شود. از این رو، دیگر سازه موتور قابل استفاده نخواهد بود. همچنین روش‌هایی که تاکنون استفاده شده، علی‌رغم اینکه توانایی خوبی در تشخیص تغییر ساختار متالورژیکی دارند همگی نیاز به آماده سازی نمونه، و مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی خواهند بود. بدین ترتیب، امکان بازرسی ۱۰۰٪ قطعات تحت سرویس با این روش‌ها وجود ندارد. لذا استفاده از روش‌هایی که با دقت و سرعت بالا، با صرف کمترین هزینه به صورت غیرمخرب تغییر ساختار متالورژیکی ایجاد شده را تشخیص دهند، ضروری می‌باشد. روش‌های غیرمخرب پایه مغناطیسی هم‌چون جریان‌گردابی که در سالیان اخیر در فرآیندهای کنترل کیفی به کار گرفته شده، حساسیت بسیار مطلوبی به تغییرات در ریزساختار، ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و تنش‌های پسماند از خود نشان داده است [۷].

آزمون جریان‌گردابی بر پایه القای الکترومغناطیسی است. جریان متناوبی که از یک سیم‌پیچ عبور می‌کند، یک میدان مغناطیسی متغییر در سیم‌پیچ ایجاد می‌کند. اگر سیم‌پیچ در نزدیکی رسانای فلزی قرار گیرد، میدان مغناطیسی وارد ماده شده، جریان دایره‌ای (گردابی) مطابق

سوپر آلیاژهای پایه نیکل مواد مقاوم به خزشی هستند که در شرایط دمای بالا به کار می‌روند. این آلیاژهای پیچیده همچنین مقاومت خوبی به خوردگی، اکسایش و مقاومت زیادی به شکست در دمای بالا دارند. در این آلیاژها از عناصر کاربیدزا و دیرگداز با نقطه ذوب بالا نظیر مولیبدن، کروم، کبالت، تنگستن و نیز عناصر تشکیل دهنده فازهای رسوبی مانند تیتانیوم و آلومینیوم استفاده شده است. وسیع‌ترین حوزه کاربرد سوپر آلیاژهای پایه نیکل صنایع هوایمایی و توربین‌های گازی است. سوپر آلیاژ Rene80 یک آلیاژ تشکیل شده از نیکل، کروم، کبالت، تیتانیوم و مولیبدن می‌باشد که از طریق محلول جامد و تشکیل کاربید مستحکم می‌شود و استحکام دمای بالا و مقاومت به اکسیداسیون قابل ملاحظه‌ای را به طور هم‌زمان دارا می‌باشد. مقادیر بالای نیکل و کروم این آلیاژ باعث ایجاد مقاومت آن در محیط‌های اکسند و کاهنده می‌شود. آلومینیوم به همراه کروم مقاومت به اکسیداسیون را در دمای بالا سبب می‌شوند. استحکام بخشی توسط محلول جامد که با وجود عناصر کبالت و مولیبدن ایجاد می‌شود، ترکیبی از استحکام بالا و مقاومت به اکسیداسیون را در دماهای بالاتر از 980°C ایجاد می‌کند [۱]. این آلیاژ با داشتن خواص مکانیکی مناسب و ریزساختار پایدار در دمای بالا در ساخت پرده‌های ثابت و متحرک توربین، برای موتورهای جت با عمر کارکرد بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای کاربرد این آلیاژ حدود 870°C است، بر این اساس پرده‌های توربین تولید شده به عنوان پرده‌های ردیف اول و دوم توربین گازی در موتورهای هوایی J85، J79 مورد استفاده قرار می‌گیرند. ریز ساختار سوپر آلیاژ Rene80 از زمینه گاما^۱ و رسوبات فاز گاما پرایم^۲ و کاربیدهای توزیع شده در زمینه گاما تشکیل شده است [۲].

فاز γ' که در حین عملیات حرارتی رسوب می‌کند دارای ساختار کریستالی مکعبی FCC می‌باشد که اتم‌های Al یا Ti در گوشه‌های ساختار مکعبی و مرکز و سطوح مکعب از اتم Ni اشغال شده است [۳]. بخش زیادی از استحکام در دمای

^۱ γ
^۲ γ'

۲- مواد و روش آزمایش

در این پژوهش از ۵ قطعه پره توربین موتور J85 از جنس سوپر آلیاژ Rene80 قابل مشاهده در شکل ۲ و ترکیب شیمیایی (حاصل از آزمون کوانتومتری) مندرج در جدول ۱ استفاده شده است. به منظور بررسی و مقایسه ریزساختار نمونه‌ها، از یک قطعه پره توربین سالم و ۴ قطعه پره توربین که به مدت ۱۶۰۰ ساعت تحت سرویس بوده‌اند استفاده شده است. به منظور درک بهتر، شرایط کاری تمامی نمونه‌ها استفاده شده در این پژوهش در جدول ۲ مشخص شده است. به منظور بررسی‌های ریزساختاری ۵ mm از قسمت ابتدایی نمونه‌ها انتخاب گردید که توسط دستگاه وایرکات بریده و آماده شدند.



شکل ۲) تصویر پره توربین از جنس سوپر آلیاژ Rene80 (نمونه شماره ۱).

جدول ۱) ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ مورد استفاده

Ni	Cr	Co	Ti	Mo	W	Al	C	Zr	B
Balance	14	9.5	5	4	4	3	0.17	0.03	0.015

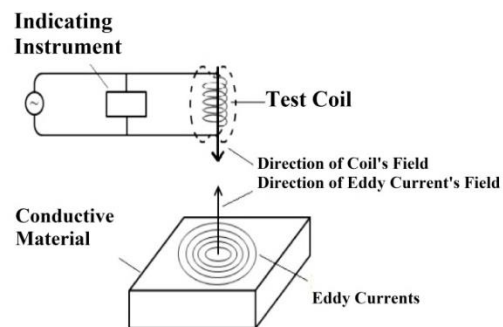
جدول ۲) شرایط کاری نمونه‌ها

شرایط کاری نمونه	نمونه
تحت سرویس نبوده	۱
تحت سرویس به مدت ۱۶۰۰ ساعت	۲
تحت سرویس به مدت ۱۶۰۰ ساعت	۳
تحت سرویس به مدت ۱۶۰۰ ساعت	۴
تحت سرویس به مدت ۱۶۰۰ ساعت	۵

مقطع عرضی تمام نمونه‌ها، پس از مانیت‌گیری تحت عملیات متالوگرافی قرار گرفت. سمباده‌زنی به ترتیب توسط سمباده‌های ۱۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ انجام شد و پس از پولیش سطح با خمیر الماسه، سطح نمونه‌ها توسط محلول

شکل ۱ در آن القا می‌شود. این جریان القایی خود شار مغناطیسی ایجاد می‌کند که جهت آن مخالف با شار مغناطیسی سیم‌پیچ است. این شار برگشتی تحت تاثیر پارامترهای الکترومغناطیسی مانند نفوذپذیری مغناطیسی و مقاومت الکتریکی است که این دو خود تحت تاثیر ترکیب شیمیایی و تغییرات ریزساختاری مانند فازهای متالورژیکی، اندازه دانه، تنش‌های داخلی و ... می‌باشند [۷-۸].

آزمون جریان گردابی دارای کاربردهایی در شناسایی و تخمین ابعاد ترک‌های سطحی و زیرسطحی، تعیین کاهش ضخامت قطعات، اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌ها و بررسی رسانایی قطعات می‌باشد [۹-۱۲]. کاربردهای مشخصه‌یابی این روش غیرمخرب نیز شامل تعیین خواص مکانیکی (سختی، استحکام و چقرمگی) [۱۳-۱۴]، بررسی فرآیند عملیات حرارتی (مشخصه‌یابی ریزساختارهای ناشی از عملیات حرارتی) [۱۵-۱۶]، تعیین ترکیب شیمیایی [۱۷]، بررسی‌های فازی در حین انجماد [۱۸]، مطالعه پوشش و مقاومت به سایش فلزات [۱۹-۲۰]، تعیین پدیده پیری در فولاد زنگ نزن دوفازی [۲۱]، و بررسی مواد متخلخل [۲۲-۲۳] و مواد مرکب [۲۴] بوده و همچنین دارای کاربردهایی در علم خوردگی فلزات شامل شناسایی ترک ناشی از خوردگی تنشی [۲۵-۲۶] و خوردگی سطح فولادهای تقویت‌کننده در بتن‌ها [۲۷] می‌باشد.



شکل ۱) تصویر شماتیک از القا الکترو مغناطیسی و جریان‌های گردابی [۸].

در پژوهش حاضر تغییرات ریزساختاری و میزان پیری سوپر آلیاژ Rene80 بعد از زمان‌های طولانی تحت سرویس به صورت مخرب و غیرمخرب مورد بررسی قرار گرفته است.

هم‌زمان بر اساس این اندازه‌گیری‌ها، شاخص‌های اولیه جریان‌گردابی شامل مقدار مقاومت القایی نرمال شده X_L^5 و مقدار مقاومت اهمی نرمال شده R_X سیم‌پیچ مربوط به هر نمونه، به صورت اعداد بی‌بعد دیجیتال شده سه رقمی روی صفحه نمایش دستگاه مشخص و ثبت شد. سپس از روی این مقادیر مطابق رابطه (۱)، شاخص دیگر جریان‌گردابی یعنی امپدانس Z^6 به دست آمد. قابل ذکر است که هم‌زمان با قرار دادن پراب روی نمونه، مقادیر مقاومت اهمی و مقاومت القایی سیم‌پیچ به سرعت تغییر می‌کند. این مقادیر واقعی با استفاده از مدار اختصاصی و تجهیزات اندازه‌گیری دقیق ولتاژ و آمپر در دستگاه جریان‌گردابی به طور جداگانه و سریع توسط دستگاه تعیین می‌شود. سپس در برنامه اجرایی دستگاه، مقادیر خام به دست آمده در ضرایب ثابتی ضرب می‌شود تا به اعداد سه رقمی بی‌بعد تبدیل شود تا ماتریس دوتایی R_X و X_L ، مختصات یک نقطه در صفحه نمایش دستگاه را نشان دهد. این ضرایب به صورت هوشمند توسط دستگاه انتخاب می‌شود که تابعی از نمونه انتخاب شده مرجع برای انتخاب نقطه مبنا^۷ و تنظیمات دستگاه شامل فرکانس انتخاب شده، مکان نقطه مبنا در صفحه نمایشگر و مقدار بزرگ‌نمایی^۸ انتخاب شده برای دو محور افقی و عمودی است. این تنظیمات به گونه‌ای انجام می‌شود که سیگنال‌های الکترومغناطیسی نمونه‌های مورد بررسی با اعداد صحیح سه رقمی با قابلیت تفکیک مناسب باشند و در صفحه نمایش قابل رویت باشند.

در این تحقیق امپدانس کوئل خالی (هوا) به عنوان نقطه مبنا انتخاب شده، که پاسخ الکترومغناطیسی بقیه نمونه‌ها با این نقطه مبنا مقایسه شده است. فرکانس 7300 Hz و بزرگ‌نمایی‌ها برای دو محور x ، y ، 35 dB به گونه‌ای انتخاب شده است تا تفکیک مناسبی بین نمونه‌ها برقرار شود.

$$Z = \sqrt{R_X^2 + X_L^2} \quad (1)$$

در صفحه نمایش دستگاه (نقشه امپدانس)، تغییرات R_X روی محور افقی و تغییرات X_L روی محور عمودی

- 5 Inductance
- 6 Impedance
- 7 Null point
- 8 Gain

چ^۱ مناسب حکاکی شد.

به منظور مطالعه ریزساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ مدل LEO 1450 آزمایشگاه پژوهشکده بوعلی مشهد بهره گرفته شد. همچنین از آنالیز عنصری^۳ برای آنالیز عنصری فازها کمک گرفته شد. پس از تهیه تصاویر میکروسکوپی مناسب از ریزساختار نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری اندازه ذرات و محاسبه درصد فاز نمونه‌ها، از نرم افزار پردازش تصویر MIP^۴ استفاده شد. در ادامه با هدف اندازه‌گیری سختی در مقطع عرضی نمونه‌ها، ریزسختی‌سنجی توسط دستگاه ریزسختی‌سنج آزمایشگاه متالوگرافی پارک علم و فناوری خراسان تحت بار ۲۵ گرم و به روش ویکرز انجام شد.

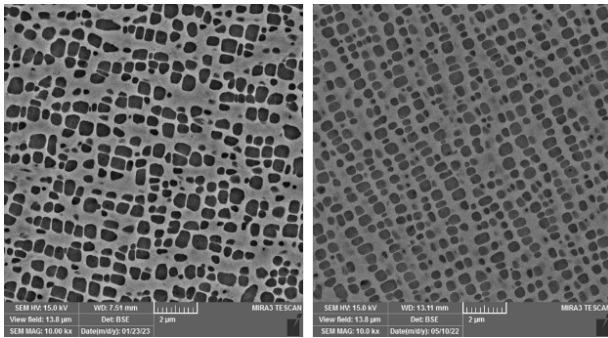
برای مشخصه‌یابی غیرمخرب، از دستگاه جریان‌گردابی پرتابل، ساخت شرکت ایرانیان هیبرید مدل IH-HCP 103 مجهز به یک پراب با هسته فریتی استفاده شد. بعد از قرار دادن پراب به صورت کاملاً عمودی و بدون فاصله روی نمونه، تغییرات ولتاژ و جریان پراب توسط دستگاه به صورت خودکار اندازه‌گیری می‌گردد. مشخصات پراب مورد استفاده در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳) مشخصات پراب اندازه‌گیری امپدانس

مقدار	مشخصات پراب
۰/۳۰	قطر سیم (میلی‌متر)
۵۰۰	تعداد دور سیم‌پیچ
۳	قطر هسته فریتی (میلی‌متر)
۲۰	ارتفاع هسته فریتی (میلی‌متر)
۸	قطر خارجی سیم‌پیچ (میلی‌متر)
۱۷	ارتفاع سیم‌پیچ (میلی‌متر)

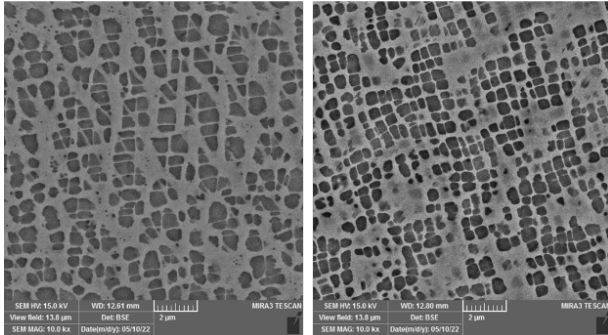
در آزمون غیرمخرب ولتاژ اولیه، ولتاژ ثانویه و امپدانس کوئل ابتدا در فرکانس‌های مختلف برای هر نمونه ثبت شد. محدوده‌ای از فرکانس که در آن خروجی‌های بدست آمده برای ریزساختارهای متفاوت، دارای بیشترین اختلاف بودند، به عنوان محدوده فرکانس بهینه (7300 Hz) تعیین شد.

- 1 Etch
- 2 Scanning Electron Microscope (SEM)
- 3 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)
- 4 Microstructural Image Processor



ب

الف



د

ج

شکل ۴) تصویر میکروسکوپ SEM (الف) نمونه شماره ۲، (ب) نمونه شماره ۳، (ج) نمونه شماره ۴ و (د) نمونه شماره ۵.

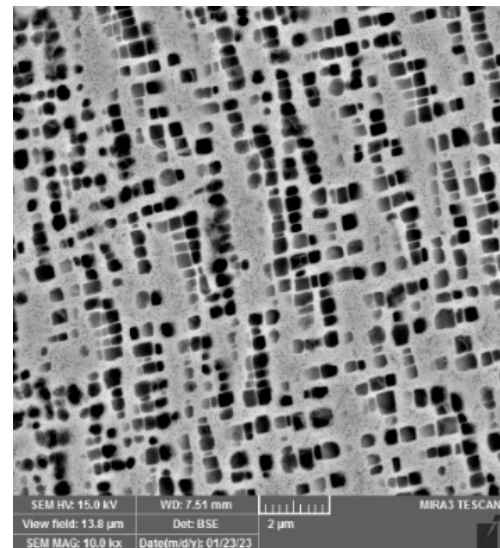
با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های تحت سرویس و مقایسه آن‌ها با یکدیگر و نمونه شاهد، تغییراتی در شکل و اندازه ذرات γ مشاهده می‌شود. در نمونه‌های تحت سرویس نسبت به نمونه شماره ۱ (نمونه شاهد)، درشت‌شدگی ذرات γ و تغییر مورفولوژی آن‌ها از حالت مکعبی به شبه‌کروی و کروی به طور واضح مشاهده می‌شود. برای مشاهده بهتر درشت‌شدگی و مورفولوژی کروی ذرات γ ، تصویر با بزرگنمایی بالاتر نیز از نمونه شماره ۳ تهیه شده است که در شکل ۵ قابل مشاهده است. علاوه بر این، مقایسه تصاویر ریزساختاری شکل ۴ نشان می‌دهد که نمونه‌های شماره ۲، ۳، ۴ و ۵ که دارای شرایط کاری تقریباً یکسان بوده‌اند، دارای کسر حجمی و اندازه ذرات متفاوت از هم می‌باشند. علت این موضوع، محل قرارگیری متفاوت پره‌ها درون موتور می‌باشد که منجر به ایجاد تفاوت‌هایی در شرایط کاری (مانند دما) شده است.

نمایش داده می‌شود و هر نمونه در این صفحه، مختصات منحصر به فرد دارد. برآیند دو متغیر R_X و X_L مطابق رابطه (۱)، معرف امپدانس (Z ، مقاومت ظاهری پراب) است. بنابراین به هنگام آزمایش، علاوه بر مقادیر دیجیتالی R_X و X_L مقدار Z مربوط به هر نمونه روی صفحه نمایش به صورت یک نقطه (موقعیت مکانی Z)، نشان داده و ثبت می‌شود. با مقایسه موقعیت‌های مکانی نمونه‌ها در صفحه نمایش (نقشه امپدانس^۱) می‌توان تحلیل‌ها و مقایسه‌های متالورژیکی روی ریزساختار و یا خواص نمونه‌ها را انجام داد.

۳- نتایج و بحث

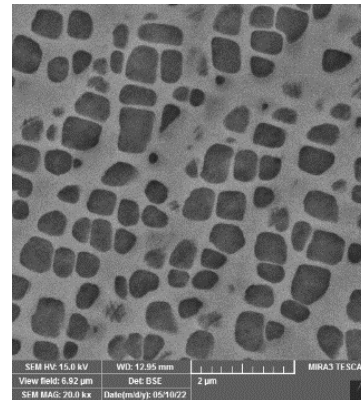
۳-۱- مشاهدات میکروسکوپی

به منظور مطالعه ریزساختار نمونه‌ها، تصویربرداری توسط میکروسکوپ SEM انجام شد. شکل ۳ ریزساختار نمونه شاهد را نشان می‌دهد که شامل ذرات مکعبی شکل γ در زمینه γ می‌باشد. ریزساختارهای نمونه‌های تحت سرویس نیز در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۳) تصویر میکروسکوپ SEM نمونه شماره ۱.

اندازه‌گیری در جدول ۴ قابل مشاهده است. همانطور که مشخص است، اندازه ذرات و کسر حجمی ذرات γ نمونه‌های تحت سرویس نسبت به نمونه شماره ۱ افزایش قابل توجهی یافته است. همچنین، نمونه‌هایی که به مدت ۱۶۰۰ ساعت تحت سرویس بوده‌اند نیز دارای مقادیر متفاوت اندازه (مساحت) و کسر حجمی ذرات γ با دلیل احتمالی شرایط کاری متفاوت ناشی از محل قرارگیری پره در توربین، می‌باشند. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده، حاصل پردازش تصویر بر روی سه تصویر برای هر نمونه می‌باشد و میانگین آن‌ها در جدول ۴ گزارش شده است.



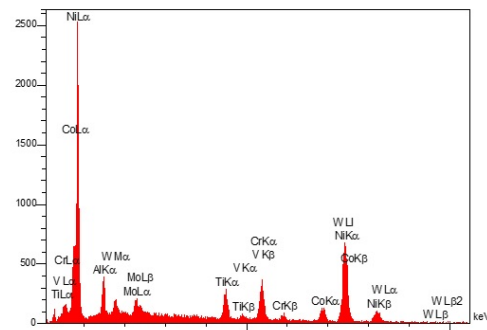
شکل ۵) تصویر میکروسکوپ SEM نمونه شماره ۳ با بزرگنمایی بالاتر.

جدول ۴) نتایج نرم افزار پردازش تصویر MIP

شماره نمونه	میانگین اندازه (مساحت) ذرات (μm^2)	درصد حجمی فاز
۱	۵۹/۷۶	۳۲/۰۹
۲	۷۶/۱۴	۴۰/۷۷
۳	۸۰/۳۴	۴۳/۱۰
۴	۸۲/۸۶	۴۴/۶۳
۵	۸۴/۱۴	۴۵/۲۲

۳-۲ آنالیز EDS

در ادامه بر روی رسوبات نمونه شماره ۳ آنالیز EDS انجام شد. نتیجه این آنالیز که در شکل ۶ آورده شده نشان می‌دهد که مطابق با انتظار، این ذرات غنی از نیکل، کبالت، تیتانیوم و تنگستن می‌باشند (در آنالیز EDS پیک‌های مربوط به این عناصر قابل مشاهده است) که عناصر اصلی برای نفوذ و رسوب گذاری فاز γ می‌باشند.



شکل ۶) نتیجه آنالیز EDS از رسوبات γ نمونه شماره ۳.

۳-۴ ریزسختی سنجی

با هدف بررسی و مقایسه دقیق تر نمونه‌های تحت سرویس با نمونه شماره ۱ (نمونه شاهد) آزمون ریزسختی سنجی از مغز نمونه‌ها در مقطع عرضی آن‌ها انجام شد. نتایج حاصل از این آزمون (جدول ۵) نشان می‌دهد که سختی نمونه‌های تحت سرویس نسبت به نمونه‌ای که تحت سرویس نبوده است کاهش پیدا کرده است. این کاهش مقادیر سختی برای نمونه‌های تحت سرویس در دمای کاری، در نتیجه درشت شدن اندازه رسوبات γ و تغییر مورفولوژی ذرات از حالت مکعبی به حالت کروی به علت رخ دادن پدیده پیری می‌باشد. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که ذرات خیلی درشت γ می‌توانند اثر معکوس بر خواص مکانیکی آلیاژ داشته باشند [۲۸]. درشت شدن اندازه رسوبات باعث می‌شود که نابعایی‌ها با صرف انرژی کمتری، با حلقه زدن از آن‌ها عبور کنند. با گذشت زمان و رخ دادن پدیده پیری در دمای کاری بالای 800°C ، با توجه به کاهش غلظت اتمی عناصر تشکیل دهنده رسوب و کاهش میزان

۳-۳ پردازش تصاویر میکروسکوپی و اندازه‌گیری درصد فاز

به منظور بررسی دقیق تر تغییرات رسوبات γ در نمونه‌های مختلف از نرم‌افزار پردازش تصویر MIP استفاده شد. به این منظور تصویربرداری از تمامی نمونه‌ها در بزرگنمایی یکسان ($1000\times$) توسط میکروسکوپ SEM انجام شد. سپس این تصاویر با هدف اندازه‌گیری درصد فاز مورد پردازش قرار گرفتند. نتایج حاصل از این

نفوذ، سختی نمونه کاهش می‌یابد [۲۹].

آزمایش‌های قبلی در فرکانس‌های مختلف به دست آمده، بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. شکل ۸ دستگاه جریان گردابی و صفحه نمایش دستگاه در لحظه انجام آزمون و مشخصه‌یابی غیرمخرب را نشان می‌دهد.

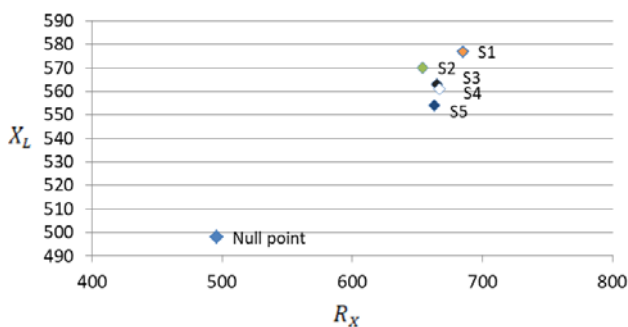


شکل ۸) تصویر دستگاه آزمون جریان گردابی در زمان انجام تست.

نقشه امپدانس نمونه‌های مختلف حاصل از آزمون جریان گردابی در فرکانس ۷۳۰۰ هرتز در شکل ۹ نشان داده شده‌است (این تصویر بازسازی شده تصویر نمایشگر دستگاه است). در این تصویر موقعیت مکانی هر نمونه (مختصات نقطه‌ای) مشخص است که حاصل چندین بار تکرار آزمون می‌باشد. مختصات دو بعدی هر نقطه معرف دو شاخص R_X (محور افقی) و X_L (محور عمودی) است.

$$L = \mu N^2 A / l \quad (2)$$

همانطور که در رابطه (۲) مشخص است با کاهش μ (نفوذپذیری مغناطیسی) مقدار ضریب خود القایی L کاهش یافته و این کاهش مقدار ضریب خود القایی، منجر به کاهش مقاومت القایی X_L طبق رابطه (۲) می‌شود.

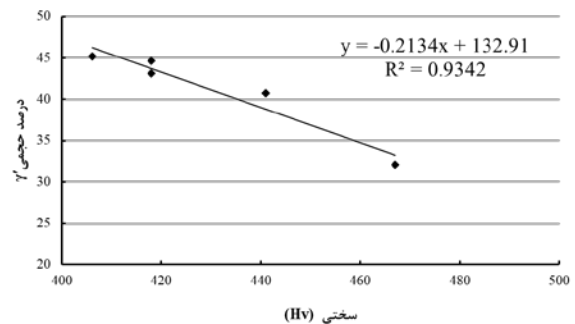


شکل ۹) نقشه امپدانس نمونه‌ها.

جدول ۵) نتایج اندازه‌گیری ریز سختی سنجی نمونه‌ها

نمونه	سختی (HV)
۱	۴۶۷
۲	۴۴۱
۳	۴۱۸
۴	۴۱۸
۵	۴۰۶

مقایسه نتایج درصد فاز و سختی سنجی نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش میانگین اندازه ذرات و درصد حجمی فاز γ' ، سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع در شکل ۷ به خوبی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، یک ارتباط خطی با ضریب همبستگی بالا میان تغییرات درصد حجمی فاز γ' و سختی نمونه‌ها وجود دارد. همچنین برای نمونه‌های ۳ و ۴ با میانگین اندازه ذرات و درصد حجمی تقریباً یکسان، عدد سختی یکسانی گزارش شده است که نشان دهنده ارتباط نزدیک تغییرات ریزساختاری و مورفولوژی رسوبات γ' بر سختی آلیاژ می‌باشد.



شکل ۷) ارتباط بین نتایج سختی سنجی و درصد حجمی فاز γ' .

۳-۵ آزمون غیرمخرب جریان گردابی

به منظور مشخصه‌یابی غیرمخرب از آزمون جریان گردابی استفاده شد. در این مرحله، به علت شکل ظاهری قوسی شکل قطعات، فیکسچری برای بهتر و دقیق‌تر قرار گرفتن پراب آزمون روی نمونه‌ها ساخته شد. سپس آزمون جریان گردابی در فرکانس بهینه ۷۳۰۰ هرتز که با انجام

امپدانس (Z) نیز کاهش پیدا می‌کند. که این کاهش در مقدار امپدانس نمونه‌ها در شکل ۹ به خوبی نشان داده شده است.

مقادیر مقاومت القایی و مقاومت اهمی مربوط به هر نمونه در جدول ۶ آورده شده است. طبق نتایج اراده شده در این جدول، با درشت شدن اندازه رسوبات و افزایش کسر حجمی آن‌ها، کاهش بیشتری در میزان مقاومت اهمی و مقاومت القایی رخ خواهد داد. بدین ترتیب، میزان کاهش در مقادیر مقاومت اهمی و مقاومت القایی برای نمونه‌ای که دارای اندازه ذرات درشت‌تر و کسر حجمی بیشتر فاز γ است، بیشتر اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است، اعداد گزارش شده شاخص‌های الکترومغناطیس مقادیر بدون بعد هستند.

جدول ۶) نتایج داده‌های آزمایشگاه الکترومغناطیسی جریان گردابی در فرکانس ۷۳۰۰ هرتز

شماره نمونه	مقاومت اهمی R_X	مقاومت القایی X_L	امپدانس Z
۱	۶۸۵	۵۷۷	۸۹۵/۶۳
۲	۶۵۴	۵۷۰	۸۶۷/۵۳
۳	۶۶۵	۵۶۳	۸۷۱/۳۱
۴	۶۶۷	۵۶۱	۸۷۱/۵۵
۵	۶۶۳	۵۵۴	۸۶۳/۹۹

به منظور بررسی ارتباط کمی میان نتایج آزمون غیرمخرب و آزمون‌های مخرب، منحنی تغییرات مقاومت القایی نسبت به تغییرات مقادیر سختی نمونه‌ها رسم گردید که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، یک ارتباط خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۵ میان تغییرات مقاومت القایی و تغییرات سختی نمونه‌ها وجود دارد. برقراری چنین ارتباطی با ضریب همبستگی بالا، نشان دهنده اطمینان بسیار بالا در پیش‌بینی سختی و پیش‌بینی میزان پیری نمونه‌ها با استفاده از این خروجی می‌باشد.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در صفحه نمایش دستگاه (نقشه امپدانس) موقعیت مکانی هر نمونه متفاوت است. به عبارت دیگر، هر نمونه دارای خواص الکترومغناطیسی متفاوتی است. این تفاوت در خواص الکترومغناطیسی را می‌توان به تغییرات متالورژیکی اتفاق افتاده در ریزساختار مرتبط دانست. به بیان دیگر می‌توان گفت که با قرار گرفتن نمونه‌ها تحت سرویس (مدت زمان طولانی کارکرد در دمای بالا) به دلیل وقوع تغییرات ریزساختاری در نمونه‌ها، پاسخ‌های الکترومغناطیسی متفاوتی دریافت می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های تحت سرویس، میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش یافته است، که می‌تواند ناشی از پدیده پیری و درشت شدن ذرات γ و تغییر مورفولوژی آن‌ها از حالت مکعبی به حالت کروی شکل و افزایش کسر حجمی فاز غیرمغناطیسی در نمونه‌ها باشد. همانطور که در مطالعات سایر پژوهش‌ها نیز مشاهده می‌شود، اندازه ذرات تاثیر زیادی (حتی بیشتر از تاثیر درصد حجمی) بر روی خواص این آلیاژ دارد [۲۸]. این ذرات نقش اساسی در قفل کردن مرزدانه‌ها و جلوگیری از لغزش یا مهاجرت آن‌ها ایفا می‌کنند. در نتیجه درشت شدن اندازه رسوبات می‌تواند موجب ضعیف شدن مرزدانه‌ها شود. لذا شاخص مقاومت الکتریکی (R_X) نمونه‌ها نیز تحت تاثیر این تغییرات ریزساختاری کاهش می‌یابد. همچنین به دنبال وقوع تغییرات ریزساختاری در نمونه‌های تحت سرویس، مقاومت القایی نمونه‌ها نیز کاهش پیدا کرده است. می‌توان بیان کرد که درشت شدن اندازه رسوبات و افزایش کسر حجمی فاز γ ، همراه با اعمال میدان مغناطیسی، باعث پین شدن دیواره حوزه‌های مغناطیسی توسط این رسوبات می‌شود، و حرکت آن‌ها در ریزساختار کاهش پیدا می‌کند. بنابراین برای ردیف کردن حوزه‌های مغناطیسی و غلبه بر این موانع، شدت میدان مغناطیسی بزرگ‌تری لازم است [۲۱]. تشکیل این فازهای پارامغناطیس در ریزساختار، کاهش نفوذپذیری مغناطیسی را به همراه خواهد داشت، که طبق رابطه (۳) با میزان ضریب خود القایی در ارتباط می‌باشد.

$$X_L = 2\pi fL \quad (3)$$

در نتیجه کاهش مقادیر R_X و X_L طبق رابطه (۱) مقدار

تعیین میزان پیری پره‌های توربین موتورهای نظامی به کمک روش غیرمخرب جریان گردابی انجام شد و مهم‌ترین نتایج حاصل از آن به شرح زیر می‌باشد.

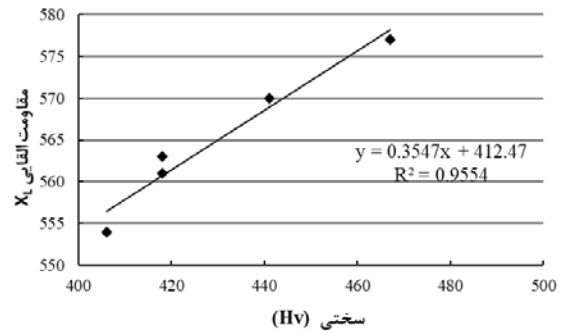
- بررسی ریزساختاری نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی SEM، نشان داده است که در نمونه‌های تحت سرویس، درشت‌شدگی اندازه رسوبات γ و افزایش درصد حجمی این فاز نسبت به نمونه شاهد رخ داده است. در نمونه‌هایی که تحت سرویس بوده‌اند نیز به علت محل قرارگیری متفاوت پره و شرایط کاری متفاوت متناسب با آن، اختلاف در میانگین اندازه رسوبات و درصد حجمی فاز γ مشاهده شد.

- نتایج آزمون ریز سختی‌سنجی نمونه‌ها نشان می‌دهد که با قرارگیری نمونه‌ها تحت سرویس، سختی این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. مقایسه سختی و تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد که افزایش اندازه رسوبات γ ، کاهش سختی را به دنبال داشته است. سختی نمونه شاهد ۴۶۷ می‌باشد که برای نمونه شماره ۵ به ۴۰۶ و پیکرز کاهش یافته است.

- نتایج آزمون جریان گردابی نشان می‌دهد که مقدار امپدانس نمونه‌های تحت سرویس نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. که به علت تغییر در ریزساختار نمونه‌های تحت سرویس در نتیجه‌ی افزایش اندازه ذرات و کسر حجمی فاز γ نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

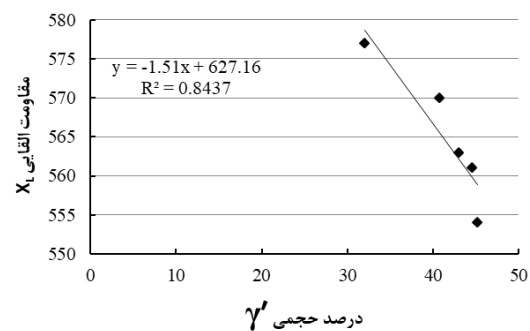
- تغییرات خروجی آزمون جریان گردابی مانند مقاومت القایی (X_L) متناسب با تغییرات سختی و کسر حجمی ذرات γ (تغییرات ریزساختاری) نمونه‌ها می‌باشد. ارتباط خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۵ میان تغییرات مقاومت القایی و سختی نمونه‌های مشاهده شده است.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش غیرمخرب پیشنهادی توانایی تفکیک نمونه‌های تحت سرویس با یکدیگر و نمونه‌ای که تحت سرویس قرار نگرفته است را با دقت بالا دارد.



شکل ۱۰) ارتباط میان مقاومت القایی و سختی نمونه‌های مختلف.

در ادامه، ارتباط میان تغییرات مقاومت القایی و تغییرات میانگین اندازه ذرات و کسر حجمی فاز γ نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این بررسی که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است نشان می‌دهد که ارتباط خطی مناسبی نیز میان مقاومت القایی و کسر حجمی فاز γ با ضریب همبستگی ۰/۸۴ نیز مشاهده شد. یعنی افزایش در میزان کسر حجمی فاز γ ، کاهش در مقاومت القایی را با یک رابطه خطی به دنبال دارد. چنین ارتباطی نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از آزمون غیرمخرب جریان گردابی و دستیابی به پارامتر مقاومت القایی، می‌توان تغییرات ریزساختاری قطعات مانند تغییرات در کسر حجمی فاز γ را پیش‌بینی نمود. این نتایج نشان می‌دهد که روش غیرمخرب پیشنهادی علاوه بر تفکیک نمونه‌های تحت سرویس با نمونه‌ای که تحت سرویس نبوده است، توانایی تفکیک میان نمونه‌های با شرایط کاری تقریباً یکسان اما با تغییرات ریزساختاری اندک را نیز با دقت بالا دارا می‌باشد.



شکل ۱۱) ارتباط میان مقاومت القایی و کسر حجمی ذرات γ برای نمونه‌های مختلف.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات ریزساختاری و

- Multilayer Aircraft Structures. *Transactions on Aerospace Research*, (2), 69-79.
- [13] Zergoug, M., Lebaili, S., Boudjellal, H., & Benchaala, A. (2004). Relation Between Mechanical Microhardness and Impedance Variations in Eddy Current Testing. *NDT & E International*, 37(1), 65-72.
- [14] Liu, T., Wang, W., Qiang, W., & Shu, G. (2018). Mechanical Properties and Eddy Current Testing of Thermally Aged Z3CN20. 09M Cast Duplex Stainless Steel. *Journal of Nuclear Materials*, 501, 1-7.
- [15] Khan, S. H., Khan, A. N., Ali, F., Iqbal, M. A., & Shukaib, H. K. (2009). Study of Precipitation Behavior at Moderate Temperatures In 350 Maraging Steel by Eddy Current Method. *Journal of alloys and compounds*, 474(1-2), 254-256.
- [16] Khan, S. H., Ali, F., Khan, A. N., & Iqbal, M. A. (2008). Pearlite Determination In Plain Carbon Steel by Eddy Current Method. *Journal of Materials Processing Technology*, 200(1-3), 316-318.
- [17] Klumper-Wetkamp, T., Mayr, P., Reimche, W., Feiste, K., Bernard, M., & Bach, F. (2003). Nondestructive Determination of the Carbon Content in Iron Foils—A Quality Assurance of the Gas Carburizing Process. In *Proceedings of the international symposium on nondestructive testing in civil engineering*.
- [18] Ciric, I. R., Hantila, F. I., Maricar, M., & Marinescu, S. (2009). Efficient analysis of the solidification of moving ferromagnetic bodies with eddy-current control. *IEEE transactions on magnetics*, 45(3), 1238-1241.
- [19] Ge, J., Yusa, N., & Fan, M. (2021). Frequency component mixing of pulsed or multi-frequency eddy current testing for nonferromagnetic plate thickness measurement using a multi-gene genetic programming algorithm. *NDT & E International*, 120, 102423.
- [20] Makarov, A. V., Gorkunov, E. S., & Kogan, L. K. (2007). Application of the eddy-current method for estimating the wear resistance of hydrogen-alloyed β -titanium alloy BT35. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 43(1), 21-26.
- [21] Alinejad, H., & Abbasi, M. (2020). Microstructurally and Electromagnetically Evaluations of Aging Phenomenon in 2304 Duplex Stainless Steel. *Metallurgical Engineering*, 23(2), 103-117. (in Persian)
- [22] Ma, X., Peyton, A. J., & Zhao, Y. Y. (2006). Eddy current measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals. *Ndt & E International*, 39(7), 562-568.
- [1] Donachie, M. J., & Donachie, S. J. (2002). Superalloys.
- [2] Safari, J., & Nategh, S. (2006). On the Heat Treatment of Rene-80 Nickel-Base Superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 176(1-3), 240-250.
- [3] Collier, J. P., Wong, S. H., Tien, J. K., & Phillips, J. C. (1988). the Effect of Varying Al, Ti, and Nb Content on the Phase Stability of INCONEL 718. *Metallurgical Transactions A*, 19, 1657-1666
- [4] Xu, Y., Jin, Q., Xiao, X., Cao, X., Jia, G., Zhu, Y., & Yin, H. (2011). Strengthening Mechanisms of Carbon in Modified Nickel-based Superalloy Nimonic 80A. *Materials Science and Engineering: A*, 528(13-14), 4600-4607.
- [5] Aghaie-Khafri, M., & Hajjavady, M. (2008). The Effect of Thermal Exposure on the Properties of A Ni-base Superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 487(1-2), 388-393.
- [6] Moradi, M., Fallah, M. M. F., Kazazi, M., & Vahdati, M. (2018). Effect of Overage Hardening Heat Treatment on the Micro Structure and Hardness of Nickel-based Super Alloy Rene-80. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, 7(3), 19-27.
- [7] Lu, Q. Y., & Wong, C. H. (2018). Additive Manufacturing Process Monitoring and Control by Non-destructive Testing Techniques: Challenges and In-process Monitoring. *Virtual and physical prototyping*, 13(2), 39-48.
- [8] Cheong, Y. M., Chaudary, M. S., Edwards, P., Grosser, P., Rodda, J., & Khan, A. A. (2011). Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in IAEA-TECDOC-628. Rev. 2 'Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques.
- [9] Hamia, R., Cordier, C., & Dolabdjian, C. (2014). Eddy-current Non-destructive Testing System for the Determination of Crack Orientation. *Ndt & E International*, 61, 24-28.
- [10] Heidari, T., & Sadeghi, S. H. (2018). Detection and Sizing of Fatigue Cracks in Metallic Structures from Eddy Current Probe Signals. *NDT Technology*, 2(2), 42-48. (in Persian)
- [11] Kahrobaee, S., Norouzi Sahraei, H., Akhlaghi Modiri, F., & Ahadi Akhlaghi, I. (2022). Design and fabrication of a non-destructive system for detecting and measuring cracks in RDD-S11 rail defect detector equipment. *NDT Technology*, 2(9), 41-51. (in Persian)
- [12] Uchanin, V. (2022). Eddy Current Techniques for Detecting Hidden Subsurface Defects in

- [23] Valiente-Blanco, I., López-Pascual, D., & Díez-Jiménez, E. (2023). Novel Method for the Characterization of the Electrical Conductivity and Eddy Current Damping of Aluminum Foams. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, 1-8.
- [24] Wakiwaka, H., Kodani, M., Endo, M., & Takahashi, Y. (2006). Non-contact measurement of CNT compounding ratio in composite material by eddy current method. *Sensors and Actuators A: Physical*, 129(1-2), 235-238.
- [25] Yusa, N., Perrin, S., & Miya, K. (2007). Eddy current data for characterizing less volumetric stress corrosion cracking in nonmagnetic materials. *Materials Letters*, 61(3), 827-829.
- [26] Kelidari, Y., Kashefi, M., Mirjalili, M., Seyedi, M., & Krause, T. W. (2020). Eddy current technique as a nondestructive method for evaluating the degree of sensitization of 304 stainless steel. *Corrosion Science*, 173, 108742.
- [27] Miller, G., Gaydecki, P., Quek, S., Fernandes, B. T., & Zaid, M. A. (2003). Detection and imaging of surface corrosion on steel reinforcing bars using a phase-sensitive inductive sensor intended for use with concrete. *NDT & E International*, 36(1), 19-26.
- [28] Barjesteh, M. M., Abbasi, S. M., Madar, K. Z., & Shirvani, K. (2019). The effect of heat treatment on characteristics of the gamma prime phase and hardness of the nickel-based superalloy Rene® 80. *Materials Chemistry and Physics*, 227, 46-55.
- [29] Yarmolenko, M. V. (1997). Enhanced diffusion and other phenomena during rapid heating of bimetals: Theory and experiments. In *Defect and Diffusion Forum*, 143, 1613-1618.