

## Metallurgical Quality Control of Aged 7075 Al Alloy Using Eddy Current Nondestructive Testing Method

Seyed Amir Hosseini<sup>1</sup>, Majid Abbasi<sup>2\*</sup>

1- Master of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.

\* abbasim@nit.ac.ir

### Abstract

The eddy current nondestructive testing (ECT) is one of the electromagnetic methods that can be used to evaluate and control the metallurgical quality of industrial alloys. The rapid implementation and digital nature of the answers have led to its use in setting up automatic inspection and quality control lines. The purpose of this paper is to investigate the metallurgical quality control conditions of 7075 aluminum alloy sheets after aging heat treatment using the ECT method. For this purpose, the destructive tests of metallography, hardness and electrical conductivity were performed along with the eddy currents Nondestructive testing and then their data were compared with each other. The sheet samples of this alloy were prepared in the form of a 1.2 mm thickness. The solution heat treatment was performed at 470 centigrade for 20 minutes and then artificial aging heat treatment was performed at different temperatures and times. Microstructural studies were performed by optical and scanning electron microscopes, standard conductivity (% ICAS) and Brinell hardness methods. Then, using an eddy current apparatus at 8 kHz, the electromagnetic responses of the samples were evaluated and compared. The results showed that to quality control and assurance of the aged products, the use of hardness index alone cannot suffice. In addition, the metallographic method has executive limitations in production processes. It was found that the eddy current responses are affected by microstructural changes resulting from aging process. Using this method, different parts of 7075 aluminum alloy can be Nondestructively separated from each other.

**Keywords:** Nondestructive Evaluation, Eddy Current Testing, Quality Control, Aging, 7075 Al Alloy.

## کنترل کیفیت متالورژیکی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ بعد از عملیات پیرسازی با آزمون غیرمخرب جریان گردابی

سیدامیر حسینی<sup>۱</sup>، مجید عباسی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

\* abbasim@nit.ac.ir

### چکیده

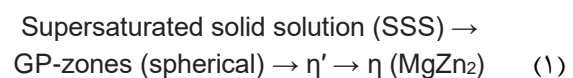
آزمون غیرمخرب جریان گردابی از روش‌های الکترومغناطیسی است. می‌توان از آن برای ارزیابی و کنترل کیفیت متالورژیکی آلیاژهای صنعتی استفاده نمود. اجرای سریع و ماهیت دیجیتالی پاسخ‌های این روش سبب شده که از آن برای راه‌اندازی خطوط مکانیزه بازرسی و کنترل کیفی خط تولید قطعات فلزی استفاده شود. هدف از این مقاله، بررسی شرایط کنترل کیفیت متالورژیکی ورق‌های آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ بعد از عملیات حرارتی پیرسازی با استفاده از روش جریان گردابی است. به این منظور آزمون‌های مخرب متالوگرافی، سختی سنجی و هدایت الکتریکی به همراه آزمون غیرمخرب جریان گردابی انجام و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شدند. نمونه‌هایی از این آلیاژ به شکل ورق به ضخامت ۱/۲ میلی‌متر تهیه شد. عملیات انحلالی در دمای ۴۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۰ دقیقه انجام شد و سپس عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی در دماها و زمان‌های مختلف انجام شد. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی، رسانایی بر اساس استاندارد (ICAS) و سختی سنجی به روش برینل انجام شد. در ادامه با استفاده از یک دستگاه جریان گردابی در فرکانس ۸ kHz، پاسخ‌های الکترومغناطیسی نمونه‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای کنترل و تضمین کیفیت محصولات پیرسازی شده، استفاده از شاخص سختی نمی‌تواند به تنهایی کفایت کند. همچنین آزمایش متالوگرافی محدودیت‌های اجرایی در فرایندهای تولید دارد. مشخص شد که پاسخ‌های جریان گردابی تحت تاثیر تغییرات ریزساختار حاصل از عملیات پیرسازی است و می‌توان توسط این آزمون، قطعات مختلف آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ را به صورت غیرمخرب از یکدیگر تفکیک نمود.

**واژگان کلیدی:** ارزیابی غیرمخرب، آزمون جریان گردابی، کنترل کیفیت، پیرسازی، آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵.

### ۱- مقدمه

در این عملیات، ابتدا مناطق GP<sup>۱</sup> (خوشه‌های غنی از منیزیم و روی در ابعاد کمتر از ۱۰ نانومتر) به صورت کاملاً هم‌سپما در زمینه فوق اشباع محلول جامد تشکیل می‌شود. انرژی فصل مشترک آنها با زمینه بسیار کم است و در نتیجه افزایش سختی آنها محدود است. فاز η' رسوب سخت‌کننده اصلی است که با زمینه آلومینیم شبه هم‌سپما است و دارای ساختار شبه پایدار هگزاگونال است. فاز پایدار η دارای ساختار هگزاگونال است که با زمینه آلومینیم غیرهم‌سپما است. تداوم فرایند پیرسازی موسوم به فراپیری<sup>۲</sup> با تشکیل و ادغام این رسوبات در یکدیگر، سبب کاهش تدریجی سختی می‌شود. با این وجود، این رسوبات در برابر حرکت

آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ از آلیاژهای کیفی استحکام بالا است که در صنایع مختلف هوافضا، هوایی و دریایی کاربرد گسترده‌ای دارد. خواص عملکردی این آلیاژ با عملیات انحلالی و رسوب سختی موسوم به عملیات حرارتی پیرسازی بهبود داده می‌شود. مراحل پیرسازی بر اساس افزایش زمان و دمای فرایند در رابطه (۱) نشان داده شده است [۱]:



<sup>2</sup> Over aging

<sup>1</sup> Guinier-Preston zone

سینق<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴] برای تعیین ضخامت ورق‌های آلومینیمی، روزن<sup>۲</sup> و همکاران [۱۵]، ارتباط میان سختی و هدایت الکتریکی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ و گائو<sup>۳</sup> و همکاران [۱۶]، تغییرات هدایت الکتریکی و مشخصات ریزساختاری آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ را با استفاده از روش جریان گردابی مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که بین پاسخ جریان گردابی با تغییرات سختی و رسانایی الکتریکی رابطه مستقیم وجود دارد.

هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی و بررسی ریزساختارهای مختلف آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ با آزمون غیرمخرب جریان گردابی و تدوین طرح کنترل کیفی آن است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ به ضخامت ۱/۲ میلی‌متر با ترکیب شیمیایی مطابق جدول (۱) استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام مراحل بعدی آزمایش، نمونه‌ها به ابعاد ۵۰ mm × ۶۰ mm از این ورق برش زده شدند. تمام نمونه‌ها ابتدا در شرایط ثابت دمایی و زمانی تحت عملیات حرارتی انحلالی قرار گرفتند. این عملیات در کوره مافلی تحت دمای ۴۷۰ درجه سلسیوس و به مدت ۲۰ دقیقه انجام شد و نمونه‌ها بعد از آن در آب، سریع سرد شدند. سپس عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی در ۶ دمای ۵۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس و دو زمان ۱۲۰ و ۲۴۰ دقیقه انجام شد. کد گذاری نمونه‌ها بر اساس روش عملیات حرارتی پیرسازی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ مورد استفاده در این تحقیق (درصد وزنی)

Al	Zn	Mg	Cu	Cr	Ti	Si	Fe
Bal.	۵/۵۰	۲/۴۰	۱/۶۰	۰/۲۰	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۷

بعد از انجام عملیات حرارتی، نمونه‌ها برای آزمایش متالوگرافی آماده شدند و از محلول کلر (۹۵ml آب، ml ۲/۵ HNO<sub>3</sub>، ml ۱/۵ HCl و ml ۱ HF) برای حکاکی استفاده شد. برای تحلیل‌های ریزساختاری و فازی از نرم‌افزار شبیه‌ساز Jmat Pro استفاده شد [۱۷].

نابجایی‌ها مقاومت نموده و سبب افزایش استحکام و سختی نسبت به نمونه‌های آنیل می‌شوند [۱-۴].

به طور معمول، کنترل متالورژیکی این آلیاژ شامل آزمون‌هایی نظیر متالوگرافی، سختی‌سنجی، کشش و خمش است. این آزمون‌ها مخرب، پرهزینه و زمان‌بر هستند و قابلیت اجرا روی همه محصولات تولید را ندارند. لذا روش‌های بازرسی و ارزیابی غیرمخرب می‌توانند سطح کنترل کیفیت محصولات تولیدی از این آلیاژهای کیفی را بهبود بخشند [۵ و ۶].

آزمون جریان گردابی یک روش غیرمخرب الکترومغناطیسی است که از آن می‌توان برای ارزیابی ریزساختار و سختی آلیاژهای کیفی آهنی و غیرآهنی استفاده نمود [۶]. در این روش، جریان الکتریکی متناوب با استفاده از یک پراب (سیم‌پیچ) به سطح ماده رسانا القاء می‌شود. جریان متناوب سیم‌پیچ (E1) باعث تشکیل میدان مغناطیسی اولیه در سیم‌پیچ (B1) می‌شود. با نزدیک شدن سیم‌پیچ به سطح جسم رسانا، جریان‌هایی موسوم به جریان گردابی (E2) در داخل ماده رسانا القا می‌شود. این جریان گردابی سبب ایجاد یک میدان مغناطیسی دیگر (B2) می‌شود. در آزمون جریان گردابی برهم‌کنش B2 بر E1 از طریق تعریف توابع الکترومغناطیسی از جمله امپدانس تعیین می‌شود و ارتباط این تأثیر بر تغییرات ریزساختاری، خواص مکانیکی، خواص فیزیکی و یا وجود ناپیوستگی‌هایی نظیر ترک یا آخال‌ها تعیین می‌شود [۵].

متغیرهای اصلی آزمون جریان گردابی عبارتند از نفوذپذیری مغناطیسی، فرکانس و رسانایی الکتریکی که عوامل مختلفی نظیر تغییرات ترکیب شیمیایی و ریزساختار مواد، عملیات حرارتی و انجام کار سرد روی این متغیرها تأثیر مستقیم دارد [۷-۵] که نمونه‌هایی از تحقیقات مرتبط با آن در ادامه ارائه می‌شود:

کاشفی و همکاران [۸] و عباسی و همکاران [۹] ارزیابی سختکاری سطحی در چدن و فولاد، جواهری و همکاران [۱۰ و ۱۱] خواص ریزساختاری و سختی گلوله‌های چدنی پرکروم، اسدی و همکاران [۱۲ و ۱۳]، میزان آستنیت باقیمانده در چدن نایهارد ۴ را با آزمون جریان گردابی مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند. از طرف دیگر،

<sup>3</sup> Guo

<sup>1</sup> Singh

<sup>2</sup> Rosen



(ب)



(الف)

شکل ۱- تصاویری از تجهیزات: (الف) اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی به روش اتصال چهارنقطه‌ای و (ب) جریان گردابی JH-ECP، نمونه‌ها و پراب‌ها مورد استفاده در تحقیق حاضر

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ریزساختار

مطابق شکل (۲)، ریزساختار ریختگی آلیاژ ۷۰۷۵ دارای فاز زمینه آلومینیم به همراه سل‌های یوتکتیکی از آلومینیم و ترکیب بین‌فلزی  $MgZn_2$  با رسوبات جزئی از نوع  $Al_3Fe$  و  $Mg_2Si$  است. مطابق شکل ۲-الف، واکنش یوتکتیک در دمای ۴۷۵ رخ می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۲-ب، میزان تقریبی  $MgZn_2$  نزدیک به ۴/۵ درصد وزنی و مجموع رسوبات  $Mg_2Si$  و  $Al_3Fe$  کمتر از ۰/۱ درصد وزنی است. چهار عنصر مس، سیلیسیم، روی و منیزیم دارای بیشترین ریزجدایش در فضای بین بازوهای دندردی دارند که سبب ایجاد ترکیبات یوتکتیکی می‌شوند. بنابراین رسوب اصلی در ریزساختار ریختگی آلیاژ ۷۰۷۵ از نوع  $MgZn_2$  است که شکل، اندازه، تعداد ذرات و نحوه توزیع آن می‌تواند بر رفتار مکانیکی، هدایت الکتریکی و در نتیجه پاسخ الکترومغناطیسی آلیاژ تأثیر داشته باشد [۱-۴]. انجام عملیات حرارتی انحلالی و پیرسازی و نورددهای گرم و سرد، تغییر اساسی در مورفولوژی و توزیع و نوع ترکیب و ساختار این رسوبات و ریزساختار نهایی آلیاژ به وجود می‌آورد [۴]. شکل (۳)، تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی (SEM) ریزساختار آلیاژ ۷۰۷۵ در شرایط بعد از عملیات انحلالی و پیرسازی در دمای ۲۰۰ به مدت ۲۴۰ دقیقه را نشان می‌دهد که به صورت نمونه ارائه شده است. مطابق شکل ۳-الف، ریزساختار بعد از عملیات انحلالی شامل زمینه فوق اشباع آلومینیم ( $\alpha_{Al}$ ) با فازهای غیرمحلول آهن‌دار است که مقدار آن کم است و رسوباتی از  $\Gamma$  مشاهده

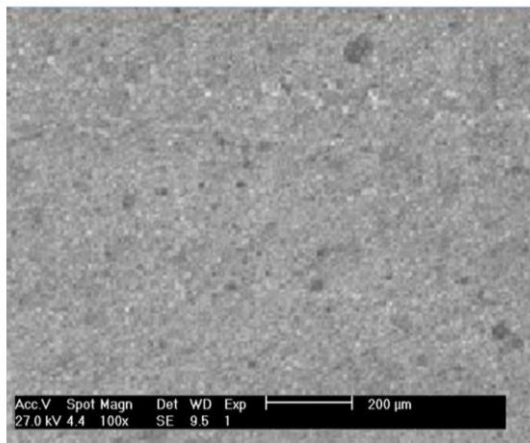
ارزیابی سختی از روش برینل با سه بار تکرار تحت نیروی  $62/25 \text{ kg}$  استفاده شد. برای اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی از روش اتصال چهارنقطه برای اتصال نمونه‌ها به دستگاه میکروهم‌متر (با دقت  $0.4 \mu\Omega \text{ cm}$ ) مدل AEMC 6250 استفاده شد (شکل ۱-الف). بر اساس استاندارد ASTM B 193(2016) نمونه‌ها با طول ۶ mm و عرض ۴ mm با مقطع مستطیلی آماده شد. نتایج خروجی این آزمون مقاومت ویژه الکتریکی و رسانایی الکتریکی در دمای  $20^\circ \text{C}$ . این آزمون در پژوهشگاه نیرو تهران انجام شد.

با استفاده از یک دستگاه جریان گردابی (IH-ECP) مطابق شکل (۱-ب) با دو پراب مطلق در دو بازه فرکانسی ۱-۲۰ کیلوهرتز و ۵۰-۲۰۰ کیلوهرتز، پاسخ الکترومغناطیسی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. امپدانس سیم‌پیچ (Z)، مقاومت القایی سیم‌پیچ ( $X_L$ ) و مقاومت اهمی سیم‌پیچ ( $R_x$ ) به عنوان شاخص‌های جریان گردابی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

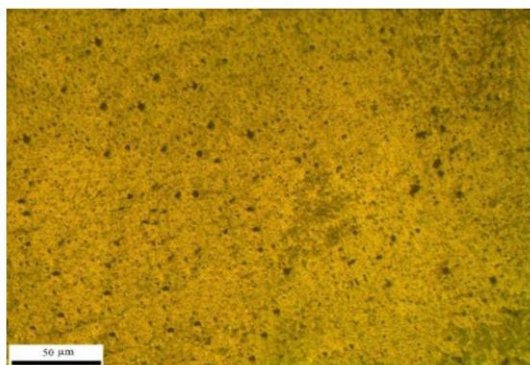
جدول ۲- چرخه‌های عملیات حرارتی پیرسازی مورد استفاده در این پژوهش و کد گذاری نمونه‌ها

کد	پیرسازی		ردیف
	زمان (دقیقه)	دما ( $^\circ \text{C}$ )	
A1	۱۲۰	۵۰	۱
A2		۸۰	۲
A3		۱۱۰	۳
A4		۱۴۰	۴
A5		۱۷۰	۵
A6		۲۰۰	۶
B1	۲۴۰	۵۰	۷
B2		۸۰	۸
B3		۱۱۰	۹
B4		۱۴۰	۱۰
B5		۱۷۰	۱۱
B6		۲۰۰	۱۲
SSS	محلول جامد فوق اشباع، SSS		۱۳
O	آنیل شده، O، (دریافت شده)		۱۴

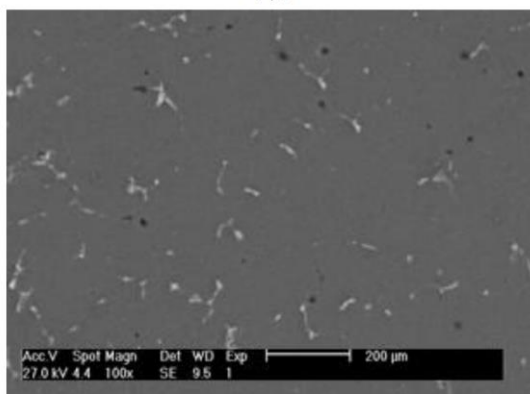
و فقط برای یک یا چند مورد به صورت محدود برای کنترل کیفی محصولات تولیدی استفاده می‌شود. نمی‌توان از روش‌های متالوگرافی برای کنترل کیفی صد درصدی محصولات تولیدی استفاده نمود به دلیل اینکه از نظر فنی و اقتصادی قابلیت توجیه ندارد.



(الف)

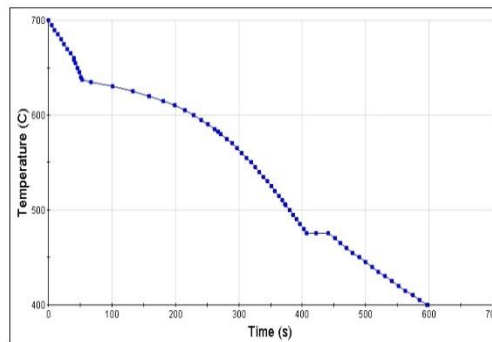


(ب)

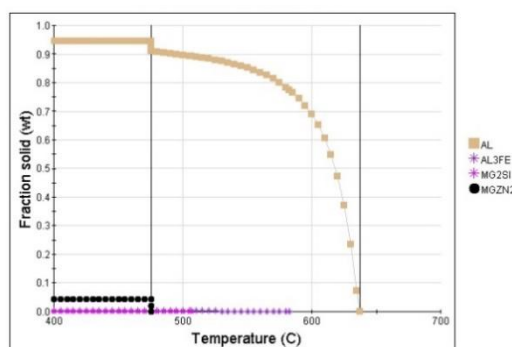


(ج)

شکل ۳- تصاویر ریزساختاری: الف) SEM بعد از عملیات انحلالی (زمینه: محلول جامد فوق اشباع)، ب) میکروسکوپ نوری و ج) SEM از نمونه پیرسازی شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴۰ دقیقه.



(الف)



(ب)

شکل ۲- منحنی انجماد و نمودار توزیع فازها در شرایط ریختگی آلیاژ ۷۰۷۵ تهیه شده از نرم‌افزار Jmat Pro

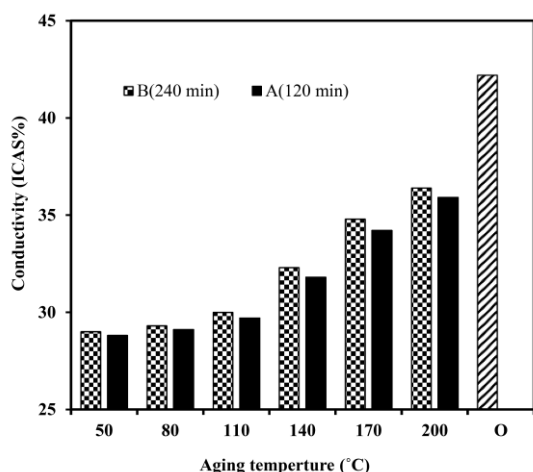
نمی‌شود. با انجام عملیات پیرسازی، مطابق شکل ۳-ب و ۳-ج، رسوبات [I] طی مراحلی که در واکنش شماره (۱) در بخش مقدمه توضیح داده شده، تشکیل می‌شود. ابعاد اندازه و نحوه توزیع این ذرات تابعی از دما و زمان پیرسازی است. به علت ریزبودن این ذرات در نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای پایین و قدرت تفکیک پایین آنها در تصاویر متالوگرافی معمولی، از ارائه بیشتر آنها صرف‌نظر شده است. برای مطالعه بیشتر در خصوص فرایند پیرسازی در آلیاژهای آلومینیم به مراجع [۱] تا [۴]، [۱۸] و [۱۹] مراجعه شود. نکته حائز اهمیت در ارزیابی تغییرات ریزساختاری نمونه‌های پیرسازی شده با تجهیزات متالوگرافی این است که این عملیات از یک طرف به دقت‌های بسیار بالا در آماده‌سازی نمونه‌ها و تحلیل داده نیاز دارد. از سوی دیگر، قدرت تفکیک این روش‌ها با توجه به تغییرات اندازه، شکل، نوع و نحوه توزیع آنها بسیار دشوار است. همچنین به علت ماهیت تخریبی، زمان‌بر و پرهزینه بودن، قابلیت اجرای در برنامه‌های کنترل کیفی محصولات تولیدی را ندارد. از این روش، برای طراحی فرایندهای تولید می‌توان استفاده نمود



ریزساختار یکسانی ندارند و در نتیجه عملکرد یکسانی هم نخواهند داشت. لذا برای کنترل کیفی محصولات این آلیاژ در فرایند عملیات حرارتی، اکتفا به سختی به عنوان تنها معیار نمی‌تواند اطمینان لازم برای تضمین ریزساختار، سختی و سایر مشخصات عملکردی آلیاژ را فراهم نماید. سایر روش‌های ارزیابی از جمله هدایت الکتریکی، استحکام کششی و جریان گردابی مطرح می‌شود. در این بین دو روش هدایت الکتریکی و جریان گردابی برای توسعه روش‌های غیرمخرب مطرح است که نتایج آن ارائه می‌شود.

### ۳-۳- بررسی رسانایی الکتریکی

در شکل (۵)، تغییرات رسانایی بر حسب دمای و زمان پیرسازی نشان داده شده است. با افزایش زمان و دمای پیرسازی، سختی و هدایت الکتریکی ورق آلومینیم ۷۰۷۵ افزایش می‌یابد. در دمای پایین پیرسازی، میزان هدایت الکتریکی کم و نزدیک به هم است اما با افزایش دما، هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. مقدار رسانایی از ۲۸/۸ (% IACS) برای نمونه پیرشده در دمای ۵۰°C تا ۴۲/۲ (% IACS) نسبت به نمونه آئیل شده (خیلی نرم) تغییر می‌کند. بالاترین هدایت الکتریکی مربوط به نمونه آئیل شده در حدود ۴۲/۲ (% IACS) و سختی حدود ۷۴ HRB است.

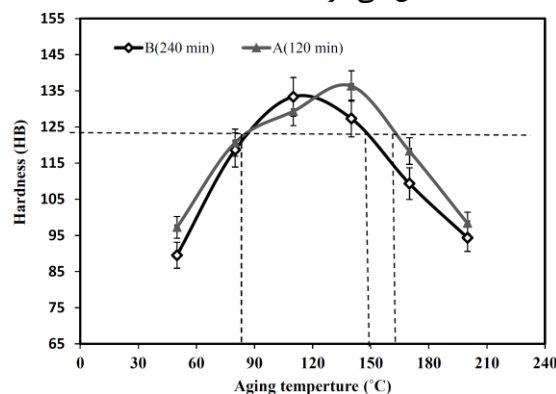


شکل ۵- ارتباط میان هدایت الکتریکی با شرایط مختلف پیرسازی.

در مرحله اول پیرسازی در دمای کمتر از ۸۰°C، کاهش اولیه رسانایی الکتریکی ناشی از تجزیه محلول جامد فوق اشباع و تشکیل رسوبات (GP) و واکنش اتم‌های

### ۳-۲- بررسی سختی

در شکل (۴)، نتایج سختی‌سنجی نمونه‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات سختی نمونه‌ها دارای حد بهینه بالا (حد ماکزیمم) است. این رفتار در هر دو زمان پیرسازی ۱۲۰ و ۲۴۰ دقیقه مشاهده می‌شود. البته در دمای پیرسازی ۲۴۰ دقیقه سختی کمتری مشاهده می‌شود. در مراحل اولیه پیرسازی با افزایش دما، سختی افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به حد بهینه بالا، افزایش بیشتر دما، سبب کاهش سختی می‌شود که به آن فرایبری گفته می‌شود. با افزایش زمان پیرسازی از ۱۲۰ به ۲۴۰ دقیقه، هم مقدار سختی در حد بهینه کاهش می‌یابد (از ۱۳۶ برینل به ۱۳۳ برینل) و هم دمای حد بهینه از ۱۴۰°C به ۱۱۰°C منتقل می‌شود.



شکل ۴- تغییرات سختی با دمای و زمان پیرسازی در ورق آلومینیم ۷۰۷۵.

در پیرسازی فاز شبه هم‌سیمای  $\eta'$  تشکیل می‌شود که به علت وجود اعوجاج‌های شبکه‌ای، سختی آن بالا است. با افزایش بیشتر دما و تبدیل این فاز به فاز پایدار و غیر هم‌سیمای  $\eta$  (MgZn<sub>2</sub>) سختی کاهش می‌یابد [۱۸ و ۱۹]. در مراحل فرایبری این فازها به شدت در هم ادغام شده و درشت می‌شوند و لذا افت سختی مشاهده می‌شود [۲۰]. نکته حائز اهمیت در کنترل سختی نمونه‌ها، این است که در دو شرایط مختلف عملیات حرارتی می‌توان سختی یکسانی به دست آورد. برای توضیح بیشتر در شکل ۴ با خط‌چین، سختی ۱۲۵ برینل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که می‌توان این مقدار سختی را هم در مراحل اولیه پیرسازی و هم بعد از پایان مرحله اول پیرسازی و در مرحله فرایبری به دست آورد. نتایج متالوگرافی آلیاژ نشان داده است که دو یا سه نمونه با سختی یکسانی که اشاره شده،

مشخص شده است و موقعیت نمونه‌های پیرشده در مدت ۲۴۰ نزدیک به نمونه متناظرش در ۱۲۰ دقیقه است. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای پیرسازی، موقعیت نمونه‌ها در صفحه امیدانسی به صورت چشمگیری تغییر می‌کند. به گونه‌ای که با افزایش دمای پیرسازی، مقدار  $R_x$  افزایش و مقدار  $X_L$  کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان پیرسازی این تأثیر به طور جزئی بیشتر می‌شود.

همان‌طور که در بخش ۳-۳ اشاره شد، با افزایش دمای پیرسازی، مقدار هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. با افزایش رسانایی، شاخص مقاومت القایی ( $X_L$ ) کاهش می‌یابد زیرا میدان مغناطیسی تشکیل شده از جریان‌های گردابی با میدان مغناطیسی کویل مخالف است [۷].

با افزایش رسانایی قطعه، جریان گردابی بیشتری در جسم ایجاد می‌شود (مطابق با قانون اهم). این موضوع باعث افزایش میدان مغناطیسی ثانویه می‌شود که طبق قانون لنز، در جهت مخالف میدان مغناطیسی اولیه است. در نتیجه میدان کل که ناشی از میدان اولیه سیم‌پیچ و میدان ثانویه است، از میدان اولیه سیم پیچ کمتر خواهد شد. بنابراین با افزایش رسانایی، نرخ جریان گردابی و همچنین میدان مغناطیسی ثانویه در سطح نمونه افزایش می‌یابد. در این شرایط با افزایش رسانایی، جریان گردابی با عمق کمتر ولی با توزیع سطحی بیشتری ایجاد می‌شود. در نتیجه شاخص مقاومت القایی پراب ( $X_L$ ) کاهش می‌یابد. مقدار  $R_x$  (شاخص مقاومت اهمی نرمال شده) که مربوط به قطعه است، افزایش می‌یابد. زیرا سیم پیچ (پراب) انرژی بیشتری برای تولید جریان‌های گردابی صرف می‌کند و این عامل به عنوان مقاومت اضافی در مدار به نظر می‌رسد [۵ و ۷].

### ۳-۵- تحلیل عددی جریان گردابی

این مرحله از تحلیل داده‌ها این فرصت را ایجاد می‌کند که بازرسی با ارائه یک مدل ریاضی به صورت هوشمند و توسط تجهیزات رباتیک و بدون دخالت مستقیم انسان (اپراتور بازرسی) انجام شود. برای تحلیل عددی پاسخ‌های الکترومغناطیسی از شاخص امیدانسی (مقاومت ظاهری پراب) ( $Z$ ) استفاده شد که در رابطه (۲) نحوه محاسبه آن بر حسب مقاومت القایی ( $X_L$ ) و مقاومت اهمی ( $R_x$ ) نشان داده شده است [۵، ۱۱ و ۱۲].

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

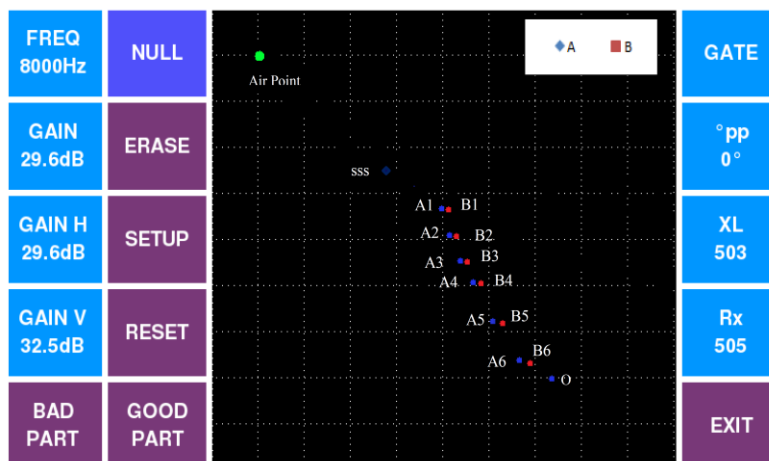
آلیاژی با جای خالی است [۲۱]. با پیشرفت پیرسازی در دمای بالاتر از دمای اتاق، اتم‌های عناصر آلیاژی از زمینه کاهش و به علت تشکیل یکنواخت رسوبات و پراکندگی الکترون‌های رانشی، رسانایی نسبت به نمونه‌های پیرسازی شده در دمای پایین، افزایش می‌یابد. از بین مناطق (GP) و رسوبات ریز نیمه هم‌سیما، مناطق (GP) تأثیر زیادی بر حرکت الکترون‌های رانشی به دلیل کرنش ایجاد شده دارد [۲۲]. مقدار افزایش رسانایی الکتریکی قبل از رسیدن به حد سختی ناچیز است و بعد از رسیدن به اوج سختی افزایش می‌یابد. در دمای بالاتر از  $140^\circ\text{C}$  علت افزایش هدایت الکتریکی ناشی از تشکیل رسوبات غیرهم‌سیما است. به طور کلی رسوبات تشکیل شده در دمای بالای پیرسازی، با زمینه فصل مشترک نیمه هم‌سیما یا غیرهم‌سیما دارد که باعث از بین رفتن کرنش داخلی شبکه می‌شود. افزایش دما، اندازه و تعداد رسوبات و هم‌سیمایی آنها با زمینه کاهش می‌یابد. در نتیجه اثر کلی این پدیده، سبب کاهش مداوم سختی و افزایش هدایت الکتریکی می‌شود [۲۱].

نکته مهم در بحث کنترل کیفی بر اساس شاخص هدایت الکتریکی این است که این شاخص می‌تواند وضعیت فرآوری و پیرشده مناسب را تشخیص دهد. حال آنکه قدرت تفکیک قطعات پیرسازی شده در داخل منطقه دمایی قبل از فرآوری یا بعد از آن دشوار است.

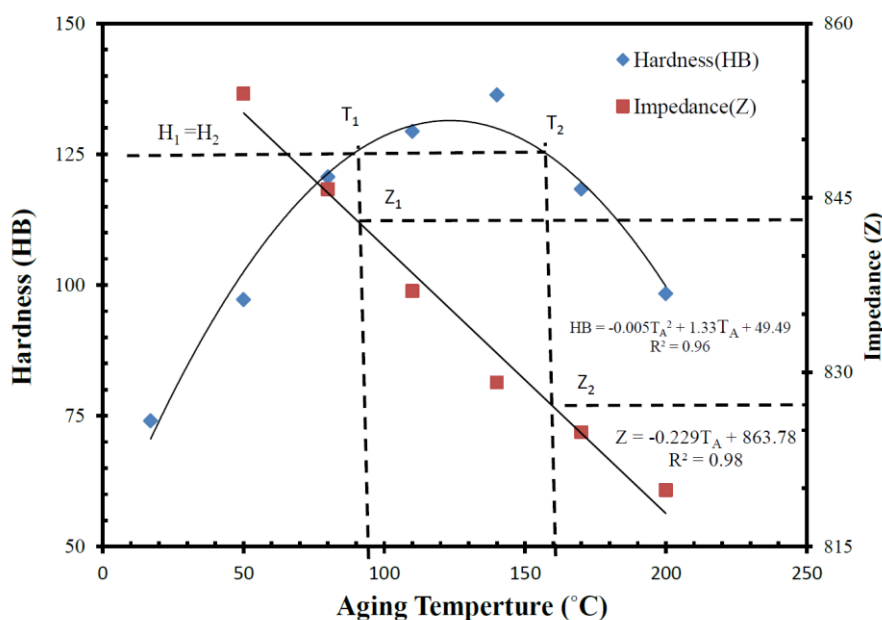
### ۴-۳- ارزیابی غیرمخرب: نقشه امیدانسی

اولین مرحله برای انجام ارزیابی غیرمخرب با جریان گردابی، تنظیم فرکانس بهینه مناسب در نمونه مورد آزمایش است. برای انتخاب فرکانس مناسب، بازرسی از بازه فرکانسی ۱ تا ۲۰۰ kHz با دو پراب متفاوت انجام شد. پراب اول با محدوده کارکرد ۱-۲۰ kHz و فرکانس ۸ kHz برای بازرسی انتخاب شد. در این فرکانس، بهترین تفکیک‌پذیری نمونه‌ها بر اساس پاسخ‌های الکترومغناطیسی به دست آمد.

در شکل (۶) نقشه (صفحه) امیدانسی این بازرسی نشان داده شده است که نموداری بر حسب شاخص  $R_x$  (شاخص مقاومت اهمی نرمال شده پراب) روی محور افقی و  $X_L$  (شاخص مقاومت القایی نرمال شده پراب) روی محور عمودی است. در این نقشه امیدانسی، موقعیت هر یک از نمونه‌ها به صورت یک مشخصه برداری دو بعدی ( $X, Y$ ) در فرکانس ۸ kHz مشخص شده است. کد مربوط به نمونه‌های پیرسازی شده در مدت ۱۲۰ دقیقه برای هر دما روی صفحه



شکل ۶- تصویر نقشه امیدانسی گرفته شده از دستگاه جریان گردابی نمونه‌های پیرسازی شده در دما و زمان‌های متفاوت با فرکانس ۸ kHz.



شکل ۷- ارتباط دمای عملیات پیرسازی با شاخص امیدانس (شاخص جریان گردابی) و سختی.

امپدانس به طور پیوسته کاهش می‌یابد ولی تغییرات سختی (که در بخش ۳-۲ مورد ارزیابی قرار گرفته است) دارای یک حد بهینه است. مشخص می‌شود که بیشترین مقدار امپدانس ( $Z_1$ ) مربوط به نمونه قبل از فرایر سازی و امپدانس کمتر ( $Z_2$ ) مربوط به نمونه فرایر شده است. با اندازه‌گیری امپدانس می‌توان ابتدا وضعیت ریزساختار و سپس وضعیت سختی را مشخص کرد. برای تشریح بیشتر به خط چین‌های رسم شده در شکل (۷) توجه شود. با پیرسازی در دو دمای  $T_1$  و  $T_2$ ، سختی یکسان ۱۲۵ برینل

شاخص امپدانس ( $Z$ ) به دلیل تاثیر هم زمان مقاومت القائی ( $X_L$ ) و مقاومت اهمی ( $R_x$ ) برای ارزیابی سختی و هدایت الکتریکی به صورت عددی و نرم‌افزاری مناسب است. مطابق شکل ۷ و داده‌های به دست آمده، رابطه  $Z$  بر حسب دمای پیرسازی ( $T_A$ ) در رابطه (۳) نشان داده شده است.

$$Z = -0.229T_A + 863.78, \quad R^2 = 0.98 \quad (3)$$

در شکل (۷)، ارتباط دما با شاخص‌های امپدانس و سختی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما، میزان



متالوگرافی ریزساختار) و امکان اجرای آن برای تولید انبوه این نوع محصولات ممکن نیست.

۳- آزمون غیرمخرب جریان گردابی به تغییرات ریزساختاری و سختی در آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ پیرسازی شده حساس است و می‌توان از آن برای تفکیک نمونه‌های پیرسازی شده در شرایط مختلف به صورت دستی (مشاهده روی صفحه امپدانس) یا به صورت مکانیزه (ارائه مدل ریاضی) استفاده نمود.

۴- شاخص امپدانس پراب (Z) در فرکانس ۸ kHz با استفاده از یک پراب عمودی نرمال می‌تواند معیاری برای ارزیابی عددی وضعیت ریزساختار و سختی باشد.

۵- با افزایش دما و زمان پیرسازی، به طور پیوسته، امپدانس جریان گردابی کاهش می‌یابد.

#### قدردانی و تشکر

نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل تحت شماره گرنت BNUT/ 944130019/99 و حمایت شرکت دانش‌بنیان ایرانیان هیبرید به خاطر مساعدت در طراحی و ساخت پراب‌های مناسب صمیمانه قدردانی می‌نماید.

چدنی، فصلنامه علوم و مهندسی سطح ایران، جلد ۹، شماره ۱۸، ص ۳۱-۲۳.

[۹] عباسی م.؛ جواهری م.؛ ریاضی س.م. (۱۳۹۷). طراحی سامانه ارزیابی غیرمخرب سختی قطعات کربونیترووره شده با آزمون جریان گردابی: مطالعه موردی استکانی دریچه. فصلنامه تحقیقات موتور. سال ۵۲ شماره ۵۲، ص ۱۹-۲۸.

[۱۰] جواهری م.؛ عباسی م.؛ بوتراپی، س.م.؛ عزیزی، ن. (۱۳۹۷). ارزیابی غیرمخرب گلوله‌های آسیا چدن پرکروم توسط آزمون جریان گردابی، نشریه علمی فناوری آزمون‌های غیرمخرب، سال ۲، شماره ۲، ص ۴۹-۵۷.

[۱۱] جواهری م.، عباسی م. (۱۳۹۶). ارزیابی ریزساختار و سختی فولاد ریختگی عملیات حرارتی شده با آزمون غیرمخرب جریان گردابی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، جلد ۱، شماره ۳، ص ۱۴۹-۱۶۰.

[۱۲] اسدی ا.، عباسی م.، شامقلی م. (۱۳۹۴). ارزیابی غیرمخرب ریزساختار چدن مقاوم به سایش ناپهارد ۴ با استفاده از آزمون جریان گردابی، مجله مهندسی متالورژی، دوره ۱۸، شماره ۵۹، پاییز، ۳۴-۴۳.

[13] Asadi, A.; Abbasi M.; Shamgholi M. (2018). Eddy current detection of retained austenite in Ni-hard4 cast iron. *Research in Nondestructive Evaluation*, 29, 1, 38-47.

حاصل می‌شود ولی مقادیر Z این دو شرایط به ترتیب ۸۴۰ و ۸۲۷ است که این تفاوت قابل مقایسه و چشم‌گیر است. این تفاوت در پاسخ الکترومغناطیسی مربوط به برهمکنش ریزساختار و خواص مکانیکی بر رفتار الکترومغناطیسی ماده است. این رفتار الکترومغناطیسی هم به هدایت الکتریکی و هم به القای مغناطیسی مرتبط است. لذا با ارزیابی رفتار الکترومغناطیسی ماده بهتر می‌توان هم سختی و هم ریزساختار ماده را برآورد کرد. لذا نمودار تغییرات امپدانس نشان‌دهنده تغییرات ریزساختار و سختی است از این رو می‌توان برای کنترل کیفی قطعات آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ در یک محدوده مشخص از تغییرات امپدانس (Z) استفاده نمود.

#### ۶- نتیجه‌گیری

۱- استفاده از شاخص سختی برای کنترل کیفی محصولات فرایند پیرسازی آلیاژ ۷۰۷۵ نمی‌تواند به تنهایی تضمین لازم برای کیفیت محصولات را ارائه دهد.

۲- کنترل کیفی نمونه‌های پیرسازی آلیاژ ۷۰۷۵ با استفاده از روش‌های متالوگرافی، چالش‌های فنی و اقتصادی خود را دارد (زمان بر، هزینه بر، و دشواری تحلیل تصاویر

#### ۴- منابع

[1] Mackenzie D.S., Totten G.E. (2003). Handbook of Aluminum, Vol. 1, Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker, New York.

[2] Polmear J., (2004). Aluminium Alloys: A century of age hardening. *Materials Forum*, 23, 18, 1-14.

[3] Koch G.H.; Kolijn D.T. (1998). The heat treatment of the commercial aluminum alloy 7075. *Materials Science and Engineering*, 9, 438, 1-12.

[4] Kilic S.; Kacar I.; Sahin M.; Ozturk F., Erdem O. (2019). Effects of aging temperature, time, and pre-strain on mechanical properties of AA7075. *Materials Research*, 22, 5, 1-13.

[5] ASM International, (2010) ASM Handbook Vol. 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control, 10th Edition.

[6] Hellier C.; Janson J. (2003). Handbook of Nondestructive Evaluation; Second Edition, New York, McGraw-Hill Companies.

[7] International Atomic Energy Agency; (2011). Eddy Current Testing at Level 2, 1st Edition, Vienna International Centre.

[۸] کاشفی م.؛ کهریابی س.؛ مسلمی معنی ص. (۱۳۹۲). تعیین غیر مخرب میزان کاربید، سختی و عمق سخت شده در سطح قطعات

temper, *Materials Science and Engineering*, 3, 8, 228-236.

[19] Du Z.W.; Sun Z.M.; Shao B.L.; Chen C.Q. (2003). Quantitative evaluation of precipitates in An Al-Zn-Mg-Cu alloy after isothermal aging. *Material Characterization*. 56, 121-128

[20] Fang S.F., Wang M.P., Song M. (2009). An approach for the aging process optimization of Al-Zn-Mg-Cu series alloys. *Materials and Design*, 5, 218, 2460-2467.

[21] Prabhu T.R. (2016). Effects of ageing time on the mechanical and conductivity properties for various round bar diameters of AA 2219 aluminium alloy”, *Engineering Science and Technology, International Journal*, 22, 533, 1-10.

[22] Guapuriche M.S.; Zhao Y.Y.; Pitman B.A.; Greene A. (2006). Correlation of strength with hardness and electrical conductivity for aluminium alloy 7010, *Transactions Technology Publications*, 24, 72, 1-8.

[14] Singh G.; Bapat H.M.; Singh B.P.; Bandyopadhyay M.; Puri R. K.; Badodkar D. N. (2013) Thickness evaluation of aluminium plate using pulsed eddy current technique. *The Institution of Engineers Indian*, 12, 23, 89-93

[15] Rosen M.; Horowitz E. (1992). The aging process in aluminum alloy 2024 studied by means of eddy currents. *Materials Science and Engineering A*, 8, 22, 191-198.

[16] Guo B., Zhang Z., Li R. (2017). Ultrasonic and eddy current non-destructive evaluation for property assessment of 6063 aluminum alloy. *NDT and NDE International*, 36, 573, 1-24.

[17] Saunders N., Guo Z., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.-Ph., (2003). Using JMatPro to Model Materials Properties and Behavior. *Journal of Metals*, 55, December, 60-65.

[18] Park J.K., Ardell A.J, (1982). Microstructure of the commercial 7075 aluminum alloy in the T651 and T7