



## تأثیر عملیات حرارتی بر ریز ساختار، خواص مکانیکی، رفتار شکست در همبسته آلومینیوم-سیلیسیوم-مس بستار

سجاد خیشه<sup>۱</sup>، خلیل خلیلی<sup>۲</sup>، محمد آزادی<sup>۳\*</sup>، وحید ذاکر هندوآبادی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، [khisheh@birjand.ac.ir](mailto:khisheh@birjand.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، [kkhalili@birjand.ac.ir](mailto:kkhalili@birjand.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، [m\\_azadi@semnan.ac.ir](mailto:m_azadi@semnan.ac.ir)

<sup>۴</sup> شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، [v\\_zaker@ip-co.com](mailto:v_zaker@ip-co.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۶ شهریور ۱۳۹۷

کلیدواژه‌ها:

همبسته آلومینیوم-سیلیسیوم-مس

بستار

عملیات حرارتی

خواص مکانیکی

طراحی آزمایشها

### چکیده

در این مقاله تغییرات ریز ساختار و خواص مکانیکی (سختی و استحکام کششی) همبسته آلومینیوم-سیلیسیوم-مس (همبسته A۳۸۰ استفاده شده در بستار موتور) در اثر عملیات حرارتی T۴ و T۶ ارزیابی و مقایسه شد. به این منظور آنیل انحلالی در دمای ۴۹۰ درجه سانتیگراد (د.س.) به مدت ۵ ساعت انجام شد. عملیات حرارتی پیرسازی T۶، در دماهای ۱۸۰، ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰ د.س. به مدت ۱، ۳، ۵ و ۷ ساعت انجام شد. در نهایت با توجه به سختی نمونه‌ها، عمل پیرسازی بهینه در دمای ۲۰۰ د.س. به مدت ۳ ساعت بدست آمد. بررسی ریزساختار و سطح شکست نمونه‌ها توسط ذره‌بین‌های نوری و برقی روبشی انجام شد. عملیات حرارتی T۶ باعث افزایش استحکام کششی از ۲۴۵ به ۲۵۵ مگاپاسکال و سختی از ۸۸ به ۹۵ ویکرز شد. با انجام فرایند T۶ در دما و زمان مشخص شده، سختی و استحکام کششی همبسته آلومینیوم-سیلیسیوم-مس به مقدار ۱۰،۵ درصد نسبت به فرایند T۴ بهبود یافت. برای تعیین اثر متغیرهای مختلف بر سختی و همچنین بهینه‌سازی آن، از طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. تحلیل حساسیت متغیرها نیز، نشان دهنده اثر مؤثر دمای پیرسازی نسبت به سایر متغیرها (زمان انحلال و اثر متقابل دما و زمان) است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

همبسته‌های آلومینیوم به دلیل قابلیت ریخته‌گری عالی، مقاومت خوردگی خوب و نسبت استحکام به وزن بالا کاربرد گسترده‌ای در صنعت دارد. همبسته آلومینیم-سیلیسیوم-مس در استانداردهای مختلف عناوین مختلفی دارد، طبق استاندارد ایزو به نام Al-Si7Cu3 و در استاندارد ASTM به نام A۳۸۰ شناخته می‌شود.

همبسته A۳۸۰ به دلیل نسبت استحکام به وزن مخصوص قوی، شکل‌پذیری مناسب، چقرمگی و مقاومت به خستگی خوب، در بخش‌های مختلف خودرو کاربرد دارد. از جمله کاربردهای این همبسته می‌توان به بستار موتور خودرو ملی (EFV) اشاره کرد.

گسترش این همبسته‌ها در صنایع، نیازمند بهبود کیفیت صنعت ریخته‌گری و عملیات حرارتی بعد از آن است. در فرآیند پیرسازی، مرحله رسوبی که عامل اصلی افزایش استحکام و سختی است، معمولاً به شکل تعادلی خود پدید نمی‌آید و بیشتر با توجه به شرایط دمایی و زمان پیرسازی، پس از گذشت چند مرحله میانی، ساختار پایدار نهایی پدیدار می‌شود.

از جمله قطعاتی که به دلیل شرایط کاری به شدت در معرض این فرایند قرار دارد، بستار موتور خودرو است. از آنجا که بستار موتور مقدار زیادی گرما از محفظه احتراق استوانه دریافت می‌کند، در نتیجه باید قابلیت پایداری خواص مکانیکی را در طولانی مدت داشته باشد. بنابراین دما و زمان عملیات پیرسازی مهم است. فرایند عملیات حرارتی T۶ از معمولترین چرخه‌های عملیات حرارتی است که روی همبسته آلومینیوم-سیلیسیوم-مس انجام می‌شود. طی این فرایند حرارتی سختی و استحکام کششی افزایش می‌یابد. علت استحکام بالای همبسته آلومینیوم-سیلیسیوم-مس، اندازه ریز و یکنواخت رسوب‌ها در مرحله دوم در شبکه است که طی عملیات پیرسازی T۶ حاصل می‌شود. به طور کلی در عملیات حرارتی پیرسازی سه مرحله وجود دارد: (۱) عملیات حرارتی آنیل انحلالی (محلول سازی) در دمای نسبتاً داغ در ناحیه تک حالتی به منظور حل شدن عناصر همبسته‌ای

(۲) سردکردن تا دمای محیط برای فوق اشباع شدن محلول جامد از این عناصر در آلومینیوم

(۳) پیرسازی به منظور جداسازی مهار شده محلول جامد فوق اشباع برای تشکیل رسوبات ریز و پراکنده در زمینه فلز

اگر این پیرسازی در دمای محیط و در حالت خود به خودی و به عبارتی بدون عملیات گرمایی انجام شود به آن پیرسازی طبیعی گفته می‌شود اما اگر این عملیات با حرارت دادن قطعه در دمای معمولی انجام شود به آن پیرسازی مصنوعی نسبت داده می‌شود.

پژوهش‌های بررسی شده بیشتر در زمینه بررسی خواص خستگی کم چرخه و پرچرخه و به تغییرات ریزساختار، استحکام کششی، فرایند شکست در نتیجه اضافه نمودن عناصر، ریزساختار ترک و تأثیر عیوب ریخته‌گری پرداخته بودند و همچنین در زمینه خواص مکانیکی بیشتر تأثیر عناصر، تنش بر ریزساختار خواص کششی، فرایند رشد ترک و سختی را بررسی کرده بودند.

در زمینه تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی نیز به ناهمساگردی بلوری و ریزساختار ذرات پرداختند. بیشتر پژوهش‌ها همبسته‌های آلومینیوم AA۵۷۵۴، AA۶۰۶۰، ۶۰۸۲، A۳۵۶، A۳۱۹، AA۷۰۷۵، AA۲۰۹۹، AA۲۰۲۶، AA۶۰۶۱، A۲۰۴، B۳۱۹، AA۲۰۲۴ بررسی و همچنین از نمونه استاندارد آزمایشگاهی استفاده کرده بودند.

زرر<sup>۱</sup> و همکاران [۱]، تأثیر وجود مس بر ریزساختار و سختی همبسته Al-Si-Cu نزدیک به یوتکتیک بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش مقدار مس در همبسته، نقطه ذوب A(AI) + Si کاهش می‌یابد و مقدار حالت‌های یوتکتیک افزایش می‌یابد.

الکسوپولوس<sup>۲</sup> و همکارش [۲]، خواص مکانیکی (شکست، استحکام کششی، کرنش-سختی کششی) A۳۵۷ همبسته آلومینیوم ریخته‌گری، را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل سطوح شکست نشان داد که فرایند شکست نمونه‌ها بر اساس شرایط پیرسازی مصنوعی متفاوت است.

پور کمالی و الوندی [۳]، تحلیل عددی-تجربی خصوصیات ماده A۳۵۶ در بارگذاری خستگی کم چرخه را بررسی کردند.

ویو<sup>۳</sup> و همکاران [۴]، تأثیر منگنز و عملیات حرارتی T۶ بر ریزساختار و خواص مکانیکی همبسته Al<sub>14.5</sub>Si<sub>4.5</sub>Cu را بررسی نمودند. اضافه نمودن ۰.۹ درصد وزنی منگنز به همبسته مقادیر حالت‌های مختلف را تغییر داد، همچنین سختی و استحکام کششی نیز افزایش یافت.

هیرت<sup>۴</sup> و همکاران [۵]، اثرات سیلیسیوم بر روی رفتار پیرسازی و قابلیت شکل‌پذیری همبسته آلومینیوم AA۶۰۱۶ را بررسی کردند. افزایش مقدار سیلیسیوم در همبسته، استحکام آن را در عملیات حرارتی T۴ افزایش داد.

اسکروتزکی<sup>۵</sup> و همکاران [۶]، با بررسی تأثیرات تنش بر روی جوانه زنی و رشد رسوبات در همبسته Al-Cu-Mg-Ag به این نتیجه رسیدند که تأثیر اصلی تنش اعمال شده بر روی فرایند جوانه زنی است.

ژئو<sup>۶</sup> و همکاران [۷]، تأثیر تنش همراه با پیرسازی بر حد تسلیم تک بلور و چند بلوری همبسته Al-Cu را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حد تسلیم در نمونه پیرسازی شده همراه با تنش، کمتر از نمونه پیرسازی شده بدون تنش است.

سهیتوگلو<sup>۷</sup> و همکاران [۸]، تأثیر رسوب سختی بر رفتار مکانیکی همبسته آلومینیوم-مس تحت عملیات حرارتی مختلف را آزمایش

<sup>5</sup> B. Skrotzki

<sup>6</sup> A.W. Zhu

<sup>7</sup> H. Sehitoglu

<sup>1</sup> M. Zeren

<sup>2</sup> N.D. Alexopoulos

<sup>3</sup> C.T. Wu

<sup>4</sup> S.M. Hirth

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- ماده

نمونه همبسته آلومینیوم- سیلیسیوم- مس به شکل استوانه، با قطر ۱۵ و طول ۱۰ میلیمتر از بستار تهیه شد. ۲۲ نمونه مطابق شکل ۱ توسط اره نواری از بستار برش داده شد، که برای بستار خام (۳ نمونه)، با عملیات حرارتی T۴ (۳ نمونه) و T۶ (۱۶ نمونه) اند. با توجه به ابعاد نمونه از هر بستار تنها یک نمونه قابل برش است. ترکیب شیمیایی همبسته مذکور به روش ریزسنجی اندازه‌گیری شد. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی همبسته در مقایسه با محدوده مجاز طبق استاندارد شماره S۲۲۱۱۴۸ پزو سیتروین مطابق درجه ASV U۳ G آورده شده است [۱۳].



شکل ۱: بستار برش داده شده

جدول ۱: ترکیب شیمیایی همبسته آلومینیوم AS7 و نمونه استاندارد (ارقام بر حسب درصدوزنی)

Al	Fe	Si	Cu	Zn	همبسته
۰٫۸	۰	۶٫۵۰	۳٫۸۰-۳٫۰۰	۰٫۳۰	استاندارد
۰٫۵	۰	۸٫۰۰			[۱]
۰٫۵	۰٫۹	۷٫۴۵	۳٫۲۰	۰٫۰۸	اندازه‌گیری شده
Mg	Mn	Ni	Pb	Ti	همبسته
۰٫۳	۰٫۵	۰٫۳۰	۰٫۱۰	۰٫۲۰	استاندارد
۰	۰				[۱]
۰٫۲	۰٫۰	۰٫۰۳	۰٫۰۵	-	اندازه‌گیری شده
۰٫۲	۰٫۰	۰٫۰۳	۰٫۰۵	-	اندازه‌گیری شده

برای یافتن دما و زمان بهینه پیرسازی در عملیات حرارتی T۶ بستار و با توجه به استاندارد ASTM-B917 [۱۴] و مرجع [۱۵] پس از آنیل انحلالی در دمای ۴۹۰ د.س. به مدت ۵ ساعت، پیرسازی در دماهای ۱۸۰، ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰ د.س. به مدت ۱، ۳، ۵ و ۷ ساعت انجام شد. برای اجرای عملیات حرارتی T۴ و T۶، از کوره عملیات حرارتی القایی استفاده شد. نمونه‌ها پس از پیرسازی در هوا سرد شدند. در نهایت با

کردند. در این پژوهش تغییرات رفتار تنش و کرنش نتایج به دست آمده از سختی‌های مختلف را اثبات نمودند. استفاده از تک بلور و چندبلور در درک نقش ناهمسانگردی و جهت بلوری مؤثر بود و نتایج نشان داد که رسوب سختی در جهت بلوری ناهمسانگردی تأثیر گذار است.

ایسادار<sup>۱</sup> و همکاران [۹]، با بررسی تأثیر عملیات حرارتی پیرسازی و آنیل کردن بر خواص مکانیکی و ریزساختار همبسته آلومینیوم ۷۰۷۵ نتیجه گرفتند که شکل‌گیری جدا شدن دانه‌های MgZn<sub>2</sub> همبسته توسط آنیل انحلالی سپس سردسازی و پیرسازی حذف خواهد شد و خواص مکانیکی همبسته بهبود خواهد یافت.

تان<sup>۲</sup> و اگل [۱۰]، تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار همبسته AA6066 را بررسی نمودند. بهترین درجه حرارت آنیل انحلالی در دمای ۵۳۰ د.س. و پیرسازی در ۱۷۵ درجه برای ۸ ساعت بود که با این عملیات حرارتی سختی نزدیک ۱۴۰ برینل بدست آمد.

جینگ فینگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۱]، تأثیر دو عملیات پیرسازی جدید، T6I6 (۱۳۰ د.س.، ۸۰ دقیقه + ۶۵ د.س.، ۲۴۰ ساعت + ۱۳۰ د.س.، ۱۸ ساعت) و پیرسازی حرارت بالا قبل از رسوب سختی (HTPP) (۴۴۵ د.س.، ۳۰ دقیقه + ۱۲۰ د.س.، ۲۴ ساعت) بر روی خواص کششی، خوردگی بین دانه‌ای و ریزساختار همبسته آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد مطالعه قرار دادند، که با روش‌های T6، T73 بازگشت و پیرسازی مجدد (RRA)<sup>۴</sup> مقایسه شدند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که عملیات حرارتی T6I6 و RRA می‌تواند مقاومت کششی بالای همبسته ۷۰۷۵ را حفظ کنند، اما پیرسازی HTPP و عملیات T73 آن را کاهش می‌دهد. ژئو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۲]، تأثیر عملیات حرارتی T۶ بر ریزساختار، خواص کششی و رفتار خستگی همبسته A356 اصلاح شده با عناصر La و Ca را بررسی نمودند.

با توجه به بررسی پیشینه تحقیق، رفتار همبسته آلومینیوم مورد تحقیق A۳۸۰، بصورت خاص، بررسی نشده است. در این تحقیق، نمونه‌های استاندارد آزمون، از بستار موتور، برش داده شدند. بنابراین، فرایند ساخت قطعه و عیوب احتمالی، در بررسی عملیات حرارتی نمونه، مدنظر قرار گرفت. در این پژوهش خواص مکانیکی نمونه بستار T۰ (خام)، T۴ (آنیل انحلالی + کوئنچ + پیرسازی طبیعی) و T۶ (آنیل انحلالی + کوئنچ + پیر شدن مصنوعی) ارزیابی و مقایسه شد. بنابراین ابتدا نمونه از بستار با توجه به دما و زمان بهینه آنیل انحلالی و پیرسازی در عملیات حرارتی T۴ و T۶ بدست آمده، برش داده شد. سپس با انجام آزمون‌های خواص مکانیکی از جمله سختی سنجی و کشش اثرات هر یک از مراحل فرایند عملیات حرارتی T۴ و T۶ بررسی و با یکدیگر مقایسه شدند.

<sup>4</sup> High-temperature pre-precipitation

<sup>5</sup> Retrogression and re-aging

<sup>6</sup> M. Zhu

<sup>1</sup> A.D. Isadare

<sup>2</sup> E. Tan

<sup>3</sup> L. Jinfeng

$$F_0 = \frac{MS_{treatment}}{MS_{error}} \quad (1)$$

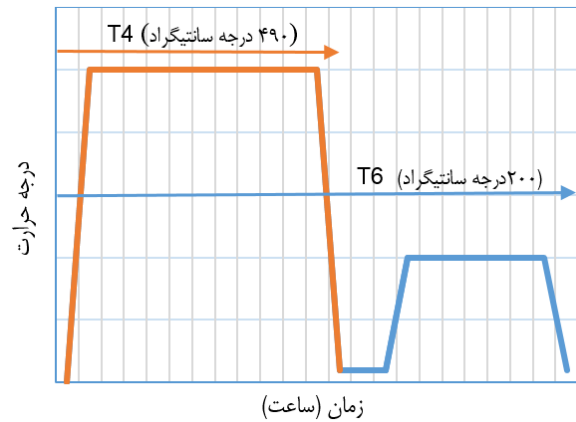
$$F_0 > F_{\alpha, \alpha-1, N-\alpha} \quad (2)$$

که در آن،  $F_{\alpha, \alpha-1, N-\alpha}$  از جداول آماری استخراج می‌شود. مقدار سطح خطر  $\alpha$ ، معمولاً برابر با ۰,۰۵ بود و ضریب اطمینان، ۹۵٪ در نظر گرفته شده است. مقادیر  $\alpha-1$  و  $N-\alpha$  نیز، درجات آزادی اثر و خطا را نشان می‌دهد. معادلات ارائه شده برای یک اثر قابل اجراست و می‌توان برای چند اثر، آن را تعمیم داد [۱۷]. تحلیل‌های آماری در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار MINITAB انجام شده است. پس از تحلیل حساسیت، با استفاده از تحلیل رگرسیون، تابعی براساس متغیرهای مدنظر ( $P_1, \dots$ ) برای تخمین مقدار سختی ( $H$ ) ارائه شده است.

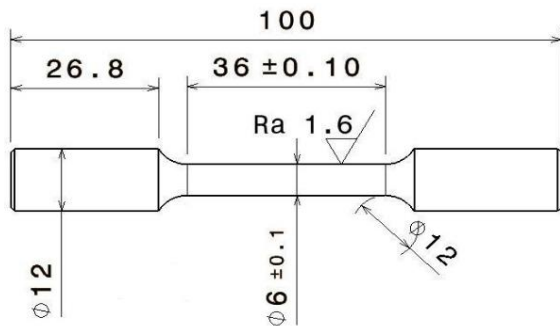
$$H = C_0 + C_1P_1 + C_2P_2 + \dots \quad (3)$$

پس از تطبیق معادله ۳ با نتایج تجربی بدست آمده، ضرائب تابع فوق ( $C_0, C_1, \dots$ ) محاسبه می‌شوند [۱۷].

توجه به نتایج سختی سنجی و کشش، پیرسازی مصنوعی بهینه در دمای ۲۰۰ د.س. به مدت ۳ ساعت انتخاب شد. چرخه عملیات حرارتی  $T_4$  و  $T_6$ ، انجام شده بر روی بستار در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: چرخه عملیات حرارتی  $T_4$  و  $T_6$



شکل ۳: هندسه نمونه آزمون کشش

## ۲-۲- سختی سنجی

برای ارزیابی سختی، از دستگاه سختی سنجی عمودی، از شرکت Wolpert آلمان استفاده شد. نمونه‌های این آزمون در ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  میلیمتر تهیه شدند. سختی سنجی طبق استاندارد ASTM-E384-99 و به روش ویکرز با فرورونده هرم مربع القاعده الماسی با نیروی ۵۰ نیوتن انجام شد. سختی سنجی به روش ویکرز نیاز به آماده سازی سطح دارد. برای آماده سازی سطح نمونه‌ها از سنباده‌های ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ استفاده شد. به منظور کاهش خطا هر نمونه سه مرتبه سختی سنجی و سپس از این سه عدد میانگین گرفته شد.

## ۳-۲- آزمون کشش

نمونه‌های آزمون کشش، طبق استاندارد ASTM-B557-06 تهیه شدند [۱۶]. در شکل ۳ هندسه نمونه آزمون کشش با توجه به استاندارد آورده شده است. آزمون کشش با استفاده از دستگاه کشش- فشار یونیورسال، ساخت شرکت SANTAM ایران (با ظرفیت ۱۵ تن) و دقت  $\pm 1\%$  انجام شد. این آزمون‌های کشش ساده، در دمای آزمایشگاه و با سرعت جابه‌جایی گیره معادل با یک میلیمتر در دقیقه، انجام گرفت.

## ۲-۴- طراحی آزمایش‌ها

به منظور ایجاد درک صحیح از اثر متغیرهای مختلف بر یک رفتار و همچنین بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر، می‌توان از طراحی آزمایش‌ها استفاده نمود که شامل چندین روش و چندین بخش است. یکی از این روش‌ها، تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل‌های آماری است. بر این اساس، با محاسبه میانگین مربعات ( $MS$ ) اثر شامل متغیر مدنظر ( $MS_{treatment}$ ) و خطا ( $MS_{error}$ ) و همچنین، مقایسه آن با مقدار مرجع حساسیت اثر بدست می‌آید [۱۷].

## ۳- بررسی نتایج

### ۳-۱- بررسی مقادیر سختی

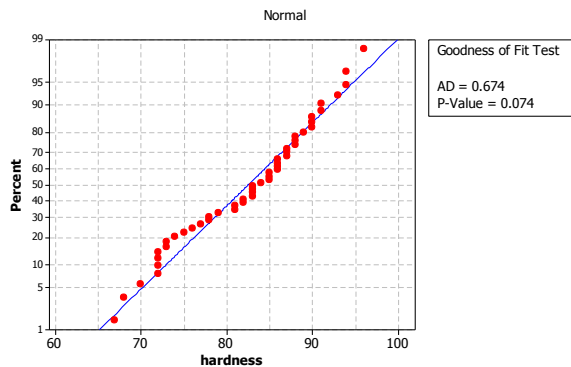
مقادیر سختی بر حسب ویکرز در طی فرایندهای پیرسازی مختلف در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: سختی (ویکرز) میانگین طی پیرسازی مختلف

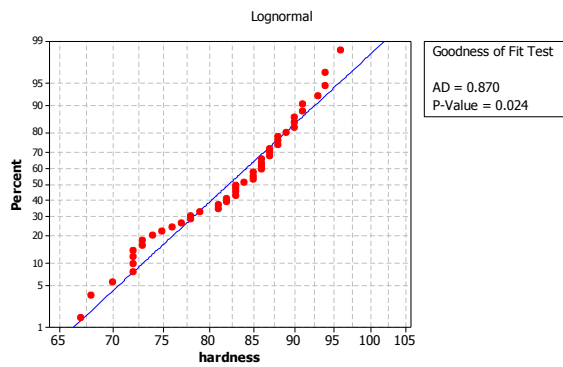
دما (د.س.)	زمان پیرسازی (ساعت)			
	۱	۳	۵	۷
۱۸۰	$86 \pm 2$	$88 \pm 3$	$85 \pm 2$	$85 \pm 5$
۲۰۰	$93 \pm 4$	$95 \pm 4$	$92 \pm 2$	$90 \pm 6$
۲۲۰	$82 \pm 1$	$84 \pm 2$	$81 \pm 4$	$79 \pm 2$
۲۴۰	$73 \pm 3$	$73 \pm 2$	$70 \pm 5$	$69 \pm 3$

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، زمان رسیدن به بیشینه سختی بسیار کوتاه بوده است و با افزایش زمان، سختی به تدریج کم شد و بعد از گذشت ۷ ساعت، سختی همبسته به حداقل مقدار خود در آن دما رسیده است. در دماهای گرم به قدری پدیده نرم شدن به سرعت

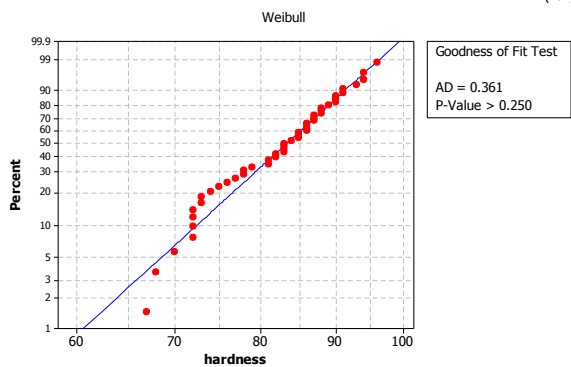
با توجه به انواع توزیع در شکل ۶ توزیع ویبال، بهترین نوع برای نمایش داده‌های بدست آمده، است. به صورت کلی تغییرات محسوس سختی در اثر عملیات حرارتی‌های پیرسازی انجام شده، قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)



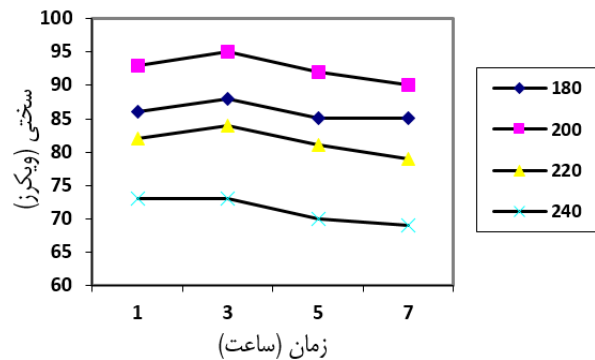
(ج)

شکل ۶: انواع توزیع داده‌های اندازه‌گیری شده برای سختی شامل: (الف) توزیع نرمال، (ب) توزیع لگاریتم نرمال، (ج) توزیع ویبال

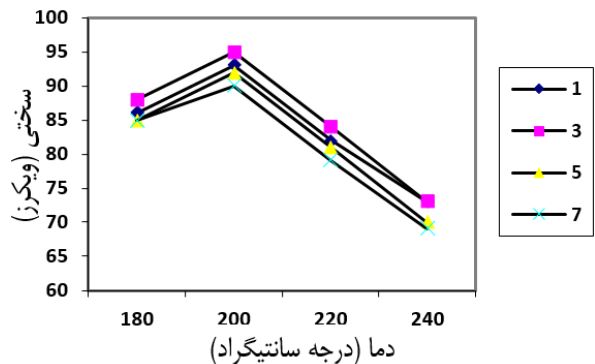
نتایج تحلیل حساسیت (شامل منحنی پارتو<sup>۲</sup>)، در شکل ۷، برای سختی اندازه‌گیری شده، آمده است. بر این اساس، متغیر دمای پیرسازی در فرایند عملیات حرارتی، متغیر مؤثر شناخته شده و بقیه متغیرها (زمان و اثر متقابل دما و زمان)، حساس نیستند. همچنین، نتایج مقادیر باقیمانده شامل احتمال نرمال مقادیر انحراف نتایج شبیه‌سازی براساس تابع رگرسیون انتخاب شده با نتایج تجربی، در شکل ۸ برای سختی (H)

صورت می‌گیرد که حتی، در زمان‌های کم نیز اختلاف سختی با نمونه T۰ (۸۸ برینل) زیاد است. این بدان معنی است که در چنین تحولات حالتی، دما نقش مهم‌تری نسبت به زمان بر عهده دارد. با افزایش دما، سرعت نفوذ افزایش یافته و فرآیند انحلال رسوبات کوچک و رشد رسوبات بزرگتر تسریع شده و همبسته نرم می‌شود.

برای مشاهده بهتر این پدیده منحنی تغییرات سختی بر حسب زمان و دمای عملیات نیز در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات افت سختی نسبت به دما بسیار حساس‌تر است که در حقیقت به علت اینکه نفوذ در پدیده نرم شدن نقش دارد، دما عامل مهم‌تری نسبت به زمان بشمار می‌رود.



شکل ۴: تغییرات سختی بر حسب زمان در دماهای مختلف



شکل ۵: تغییرات سختی بر حسب دما در زمان‌های مختلف

### ۳-۲- بحث بر روی نتایج سختی

مقدار انحراف از انواع توزیع (عمومی<sup>۱</sup>، نرمال لگاریتمی و ویبال) داده‌های سختی اندازه‌گیری شده، در شکل ۶ نشان داده است. در تحلیل‌های آماری، برای تعیین معنی‌دار بودن یک مقدار عددی، از آزمون‌های فرضیه آماری همچون مقدار A-D و مقدار P-value استفاده می‌کنند. در مقایسه تناسب انواع توزیع داده‌های تجربی، بهترین آن با بزرگترین مقدار P-value و کمترین مقدار A-D، مشخص می‌شود [۱۸].

<sup>2</sup> Pareto

<sup>1</sup> Normal

برابر با ۳ ساعت در نظر گرفته شد. لذا در گام بعدی، براساس فرایند پیرسازی بهینه شده، برای بررسی دقیق تر استحکام کششی در زمان ۳ ساعت و دمای متفاوت، پیرسازی، مدنظر قرار می گیرد که در نهایت خصوصیات ریز ساختار نمونه بهینه سازی شده با نمونه T۴ و T۶ مقایسه می شود.

جدول ۳: دقت و حساسیت تابع رگرسیون برای مقدار سختی

Parts Constant	P-value	F-value	SS
T	۰,۰۰۰	۷,۵۱	۱۷۵,۷۳
t	۰,۰۶۳	۱۳۷,۴۱	۲۳۰,۱,۵۶
T × t	۰,۷۲۳	۰,۶۸	۳۴,۰۲
R <sup>2</sup>			٪ ۹۰,۰۶

### ۳-۴- بررسی خواص استحکام کششی

مقادیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی به دست آمده از آزمون کشش، نمونه های T۰، T۴ و T۶ (تحت دمای پیرسازی مختلف) در جدول ۴ نشان داده شده است. بررسی خواص کششی همبسته های عملیات حرارتی شده حاکی از آن است که پس از اعمال چرخه حرارتی T۶ به سبب استحکام دهی زمینه توسط رسوبات Mg<sub>2</sub>Si و بهسازی حرارتی ذرات سیلیسیم یوتکتیک (شکل ۹)، استحکام کششی همبسته نسبت به شرایط بدون عملیات حرارتی بهبود می یابد.

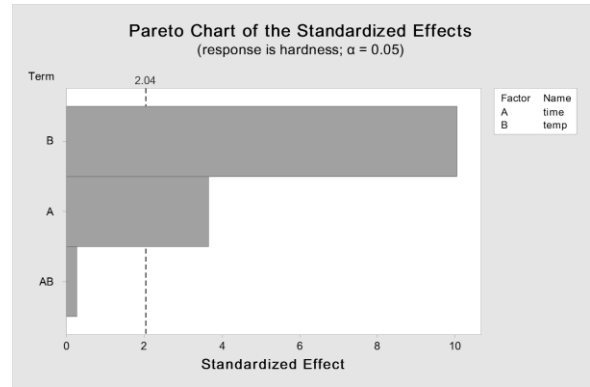
جدول ۴: نتایج آزمون کشش ۳ ساعته با دمای پیرسازی مختلف

نمونه	دمای پیرسازی (د.س)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)
T۰	-	۲۴۵±۴	۱۷۴±۶
T۴	-	۲۳۰±۲	۱۵۱±۳
	۱۸۰	۲۳۴±۳	۱۵۸±۶
T۶	۲۰۰	۲۵۵±۴	۱۷۱±۴
	۲۲۰	۲۳۴±۳	۱۲۸±۶
	۲۴۰	۱۶۶±۲	۱۰۳±۵

تأثیر عملیات حرارتی در بهبود خواص، با وجود مس بیش از پیش نمایان می شود. استحکام کششی کلیه همبسته ها با افزایش غلظت مس، به صورت خطی افزایش می یابد. مهم ترین علت این مطلب را می توان تقویت استحکام دهی زمینه از طریق رسوبات Al<sub>2</sub>Cu در کنار رسوبات Mg<sub>2</sub>Si عنوان نمود [۱۹، ۲۰].

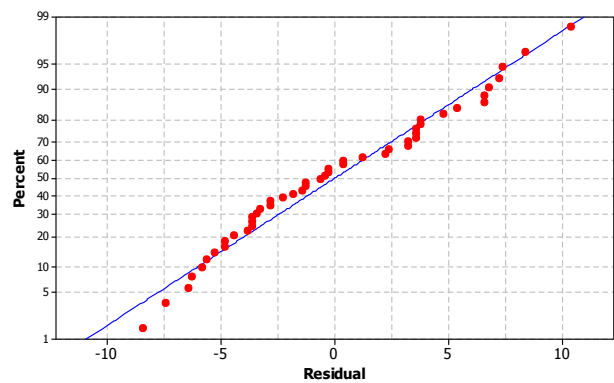
همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است استحکام کششی در نمونه T۴ دارای کمترین مقدار است. این کاهش را با توجه به ریزساختار در شکل ۱۰، می توان به ناپدید شدن حالت های یوتکتیک و وجود حالت های نامحلول در ریزساختار نمونه آنیل انحلالی شده نسبت داد.

آمده است. نتایج این شکل، نشان دهنده انحراف کم مقادیر باقیمانده برای سختی ماده است.



شکل ۷: نتایج تحلیل حساسیت سختی

(response is hardness)



شکل ۸: احتمال توزیع عادی مقادیر باقیمانده سختی

معادلات حاصل از تحلیل رگرسیون سختی براساس متغیرهای دمای انحلال (T) و زمان انحلال (t) در فرایند عملیات حرارتی نیز، به شرح زیر می باشد:

$$H = 137 - 0.25t - 0.592T \quad (۴)$$

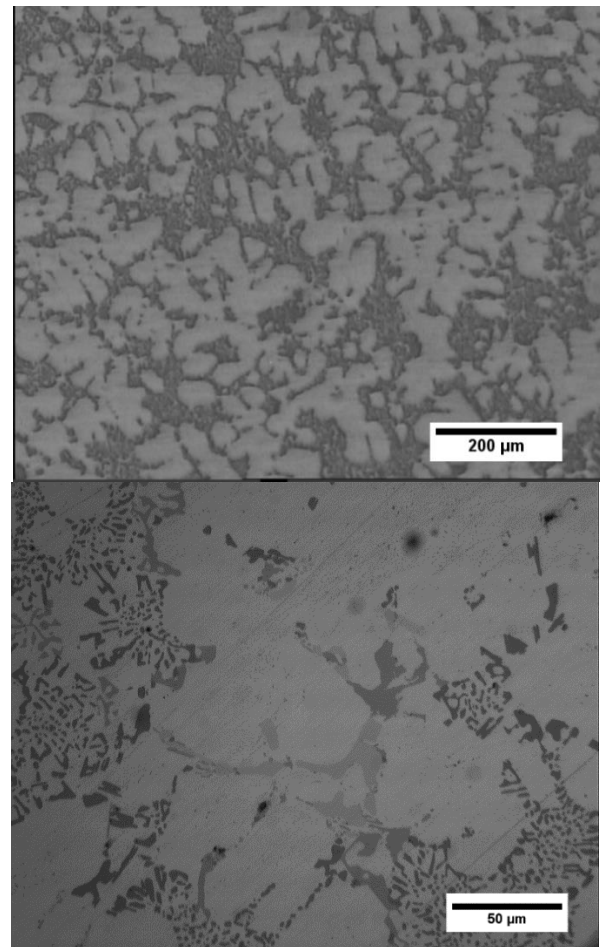
قابل ذکر است که دقت و حساسیت هر متغیر در معادله (شامل مقادیر P-Value، F-Value، SS و R<sup>2</sup>) در جدول ۳ آمده است. ضمناً مقدار P-value، سطح معنی داری، مقدار F-value، نسبت واریانس و SS، مقدار مجموع مربعات است. سطح اطمینان در این تحقیق برابر ۹۵٪ انتخاب شده است. مقدار P-value کمتر از ۰,۰۵ نشان دهنده آن است که متغیر متناظر، تأثیری معنادار بر سختی دارد. نتایج نشان می دهد که متغیر دما، حساس ترین متغیر مؤثر بر سختی است.

براساس نتایج بدست آمده، می توان مقادیر بهینه برای دما و زمان پیرسازی در فرایند عملیات حرارتی را با تابع هدف افزایش سختی، محاسبه نمود. در صورتی که تابع هدف، فقط مقادیر سختی انتخاب شود، دمای پیرسازی بهینه برابر با ۲۰۰ د.س. و زمان پیرسازی بهینه برابر با ۳ ساعت انتخاب می شود.

با توجه به اینکه، حساسیت تغییرات سختی به متغیر دما بیشتر وابسته است، بنابراین برای بررسی استحکام کششی، زمان پیرسازی ثابت و

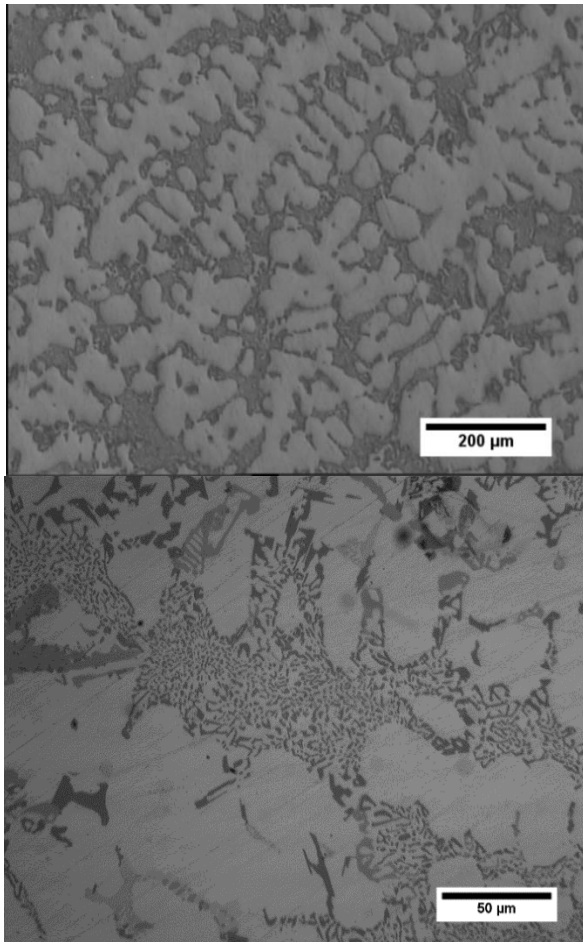
## ۳-۳- بررسی ریزساختار

در شکل ۹ تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار نمونه T۰ نشان داده شده است.



شکل ۹: تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه T۰ با دو بزرگنمایی

برای ایجاد رسوبات بسیار ریز با توزیع همگن در حین عملیات پیرسازی در دسترس نخواهد بود و در نتیجه بیشینه سختی و استحکام ممکن، پس از این نوع عملیات حرارتی بدست نخواهد آمد.



شکل ۱۰: تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار نمونه T۴ در دمای ۴۹۰ د.س. به مدت ۵ ساعت، با دو بزرگنمایی مختلف

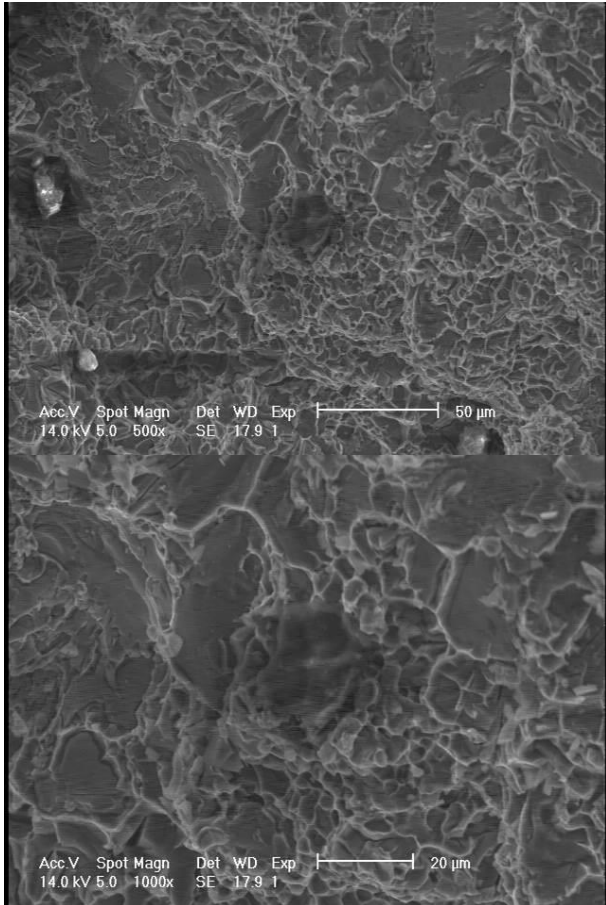
در شکل ۱۱ تصویر ذه بین نوری از ریزساختار نمونه T۶ نشان داده شده است. تأثیر مثبت عملیات حرارتی بر ترکیبات بین فلزی غنی از آهن از دو جنبه قابل بررسی است، نخست آنکه سرعت انتقال جرم و نرخ نفوذ اتمها در لبه‌های تیز و نقایص سطحی تند است. بنابراین در صورت عملیات حرارتی، ذرات سیلیسیوم یوتکتیک، با فرایند گلوبی شدن، به تدریج خرد شده و در نتیجه طول متوسط آنها کاهش یافته و لبه‌های تیز آنها گرد می‌شود [۲۱].

بر این اساس پس از عملیات حرارتی، توزیع ظریف و پراکنده‌ای از صفحات سیلیسیوم یوتکتیک در زمینه ایجاد می‌شود، که سختی و استحکام همبسته را بهبود می‌دهد. علاوه بر این نفوذ اتم‌های تشکیل دهنده صفحات سیلیسیوم یوتکتیک طی عملیات حرارتی، علاوه بر کاهش ابعاد و تیزی لبه‌های صفحات، با ایجاد پیوند نفوذی قوی بین ذرات و زمینه، ضمن افزایش استحکام فصل مشترک، نقش بسیار مهمی در بهبود خواص نهایی همبسته ایفا می‌کند که این موضوع توسط

حضور عناصری نظیر آهن، مس، منگنز و نیکل در کنار سیلیسیم و آلومینیوم منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی می‌شوند. اگر چه حضور این ترکیبات می‌تواند سبب افت استحکام کششی و مقاومت به ضربه همبسته گردد، ولی سبب افزایش سختی در همبسته می‌گردد. شایان ذکر است که گوشه‌های ذرات سیلیسیم در حالت صفحه‌ای و نوک تیز، محل تمرکز تنش هستند و در نتیجه باعث کاهش خواص مکانیکی همبسته می‌شوند.

در شکل ۱۰ تصویر ذره بین نوری از ریزساختار نمونه T۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که پس از عملیات انحلال، همچنان ترکیبات بین فلزی درشتی از حالت‌های غنی از مس در ساختار و در امتداد مرز دانه‌ها حضور دارند. حضور این ترکیبات بین فلزی پس از انجام عملیات حرارتی برای خواص مکانیکی مضر هستند زیرا اولاً حضور آنها در امتداد مرز دانه‌ها باعث تردی و کاهش شکل پذیری همبسته می‌شود و ثانیاً مس موجود در ترکیب این همبسته‌ها

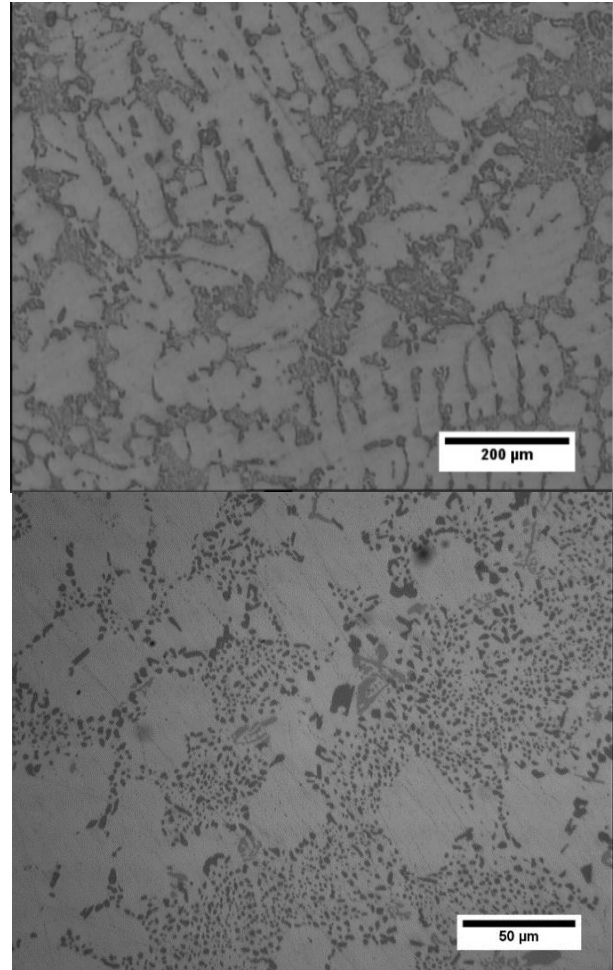
در شکل ۱۲ تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه کشش T<sub>0</sub> نشان داده شده است. در تصویر سطح شکست نمونه T<sub>0</sub>، وجود تعداد بیشتر حفره‌های کوچک نسبت به حفره‌های متوسط، وجود فرورفتگی‌های کشیده شده، احاطه شدن فرورفتگی‌های متوسط توسط ریزحفرات و وجود حفرات ترک خورده و رشته‌های سفید رنگ نشان دهنده ترد بودن ساختار است.



شکل ۱۲: تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه T<sub>0</sub> با دو بزرگنمایی مختلف

شایان ذکر است که ترد بودن به صورت کامل در تمام قسمت‌های نمونه وجود ندارد و در بعضی قسمت‌ها فرورفتگی‌هایی با اندازه‌های متوسط و نسبتاً بزرگ در سطح شکست دیده می‌شود. با بررسی سطح شکست نمونه T<sub>0</sub> می‌توان گفت درصد ترد بودن سطح شکست ۷۰ درصد است. این مطلب در مرجع [۲۲] نیز نشان داده شده است. در شکل ۱۳ تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه T<sub>۴</sub> نشان داده شده است. سطح شکست این نمونه دارای برآمدگی‌هایی است که به صورت هم‌محور رشد کرده‌اند. روی برآمدگی‌های بزرگ بسیاری از برآمدگی‌های ریز را می‌توان مشاهده نمود که نشان دهنده رفتار شکست نرم است. با بررسی سطح شکست نمونه T<sub>۴</sub> می‌توان گفت درصد ترد بودن سطح شکست ۴۰ درصد است.

چوبی و همکاران به اثبات رسیده است و تأییدی بر نقش ذرات سیلیسیوم یوتکتیک در ممانعت از حرکت نابجایی‌ها است [۲۱]. علاوه بر این با توجه به انحلال و کاهش کسر حجمی ترکیبات بین فلزی طی عملیات حرارتی، سهم این رسوبات در اشاعه ترک‌های ایجاد شده بسیار کم بوده و رشد ترک عمدتاً مستلزم عبور از فاز نرم زمینه و مناطق بین دندریتی است.

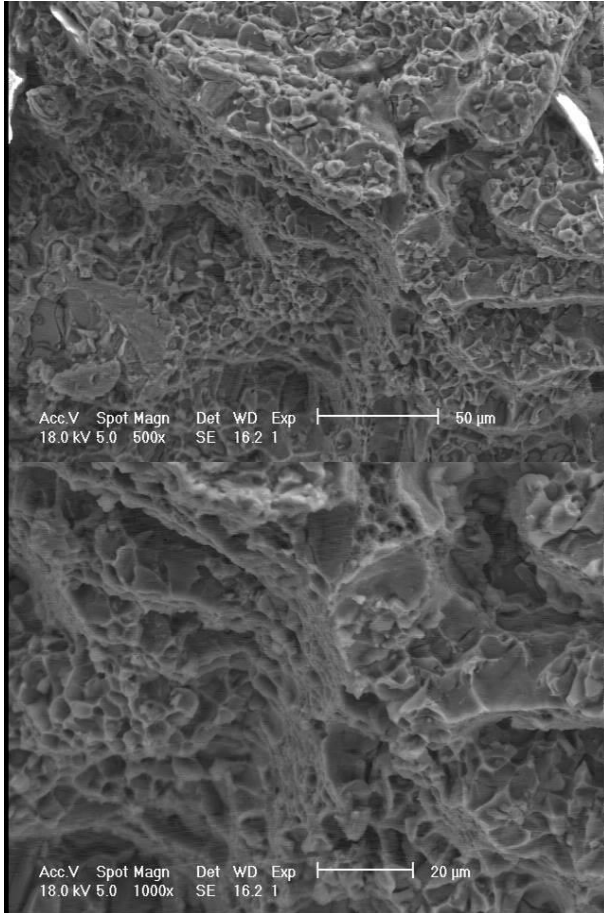


شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار نمونه T<sub>۶</sub> پیرسازی شده در دمای ۲۰۰ د.س. به مدت ۳ ساعت، با دو بزرگنمایی مختلف

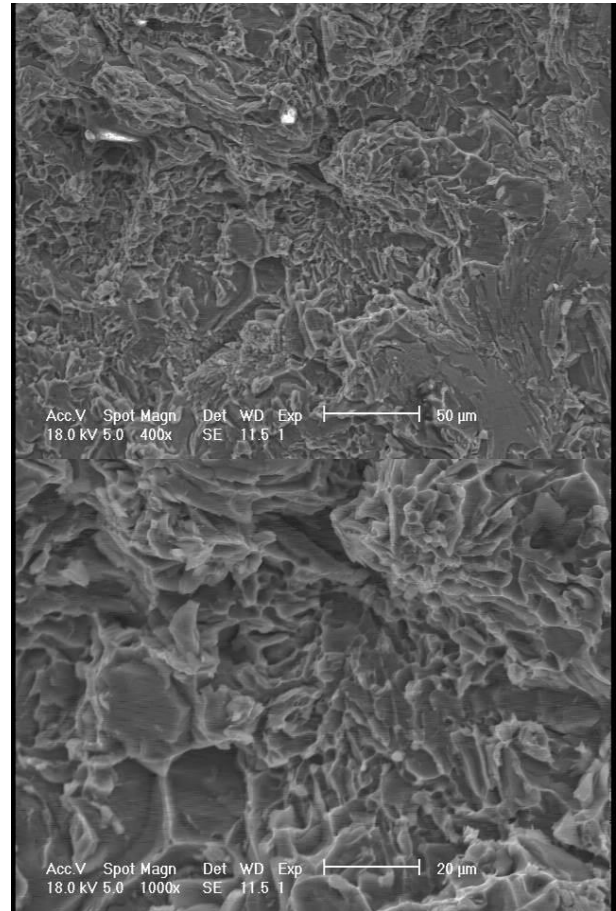
### ۳-۴- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست

بررسی و مقایسه سطوح شکست نمونه‌های کشش کمک شایانی به توجیه رفتار مکانیکی نمونه‌ها می‌نماید. در این تصاویر تأثیر عملیات حرارتی بر شکل سطح شکست نمونه‌ها را می‌توان دید. شکست در آزمون کشش، بین حالت‌های سیلیسیوم یوتکتیک رسوب گذاری شده در مرز دانه‌ها رخ داد. در سطوح شکست ذرات سیلیسیوم درشت قبیل از عملیات حرارتی مشاهده می‌شود. بعد از عملیات حرارتی نیز، اندازه سلول‌های دندریتی کاهش می‌یابد.

به سبب استحکام دهی زمینه توسط رسوبات  $Al_2Cu$  در کنار  $Mg_2Si$  و بهسازی حرارتی ذرات سیلیسیم یوتکتیک عنوان نمود. بررسی تصاویر میکروسکوپ برقی روشی سطح شکست نمونه‌ها بیانگر وقوع شکست شبه ترد یا کلیواژی، با جذب انرژی کم، در نمونه‌ها بود.



شکل ۱۴: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روشی از سطح شکست نمونه T۶ با دو بزرگنمایی مختلف



شکل ۱۳: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روشی از سطح شکست نمونه T۴ با دو بزرگنمایی مختلف

در شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روشی از سطح شکست نمونه T۶ نشان داده شده است. وجود تعداد بیشتر حفره‌های کوچک نسبت به حفره‌های متوسط، وجود فرورفتگی‌های کشیده شده، احاطه شدن فرورفتگی‌های متوسط توسط ریز حفرات و وجود حفرات ترک خورده نشان‌دهنده ترد بودن ساختار است. قوی بودن استحکام تسلیم و نهایی نمونه T۶ نیز ترد بودن نمونه را تأیید می‌کند. با بررسی سطح شکست نمونه T۶ می‌توان گفت درصد ترد بودن سطح شکست ۸۵ درصد است. این مطلب در مرجع [۲۲] نیز نشان داده شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا، اثر دو متغیر دما و زمان پیرسازی در فرایند عملیات حرارتی همبسته  $A3\gamma$  که در بستر موتور استفاده می‌شود، با تابع هدف افزایش سختی، بررسی شد. نتایج تحلیل حساسیت سختی نشان داد که، متغیر مؤثر دمای پیرسازی است و اثر متغیرهای دیگر ضعیف است. نتایج بهینه سازی سختی، نشان داد که دمای پیرسازی بهینه برابر با ۲۰۰ د.س. و زمان پیرسازی بهینه برابر با ۳ ساعت است. استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم در فرایند T۶ نسبت به T۴ افزایش یافت. با توجه به تصاویر ذره‌بینی بدست آمده دلیل این امر را می‌توان

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از کارکنان شرکت فراسازکیا و بویژه مدیریت محترم عامل جناب آقای مهندس بهزاد نژاد و همچنین، شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) و آقای مهندس امیر مافی، اعلام می‌دارند.

#### مراجع و منابع

- [1] M. Zeren, E. Karakulak, and S. Gumus, Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 21, no. 8, pp. 1698-1702, 2011
- [2] N.D. Alexopoulos and M. Tiryakioglu, Relationship between Fracture Toughness and Tensile Properties of A357 Cast Aluminum Alloy, Metallurgical and

- [12] M. Zhu, Z. Jian, G. Yang and Y. Zhou, Effects of 6T heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys, *Materials and Design*, vol. 36, pp. 243-249, 2012
- [13] AlSi9Cu3 Aluminum Alloy Permanent Mold Casting Material Specifications, Instruction Work, PSA Peugeot Citroen Company, 2007
- [14] ASTM B917 / B917M-12, Standard Practice for Heat Treatment of Aluminum-Alloy Castings from All Processes, ASTM, 2012
- [15] E. Sjolander and S. Seifeddine, The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 10, pp. 1249-1259, 2010
- [16] ASTM B557M-15, Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products (Metric), ASTM, 2015
- [17] M. Azadi, Analysis and improvement of a passenger car NVH behavior using DOE method, MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, 2008
- [18] M. Jamalkhani Khameneh and M. Azadi, Reliability prediction, scatter-band analysis and fatigue limit assessment of high-cycle fatigue properties in EN-GJS700-2 ductile cast iron, 12th International Fatigue Congress, vol. 165, 2018
- [19] E. Sjolander and S. Seifeddine, Artificial ageing of Al-Si-Cu-Mg casting alloys, *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, no. 24, pp. 7402-7409, 2011
- [20] M. Azadi and M.M. Shirazabad, Heat treatment effect on thermo-mechanical fatigue and low cycle fatigue behaviors of A356.0 aluminum alloy, *Materials and Design*, vol. 45, pp. 279-285, 2013
- [21] S. W. Choi, The effects of cooling rate and heat treatment on mechanical and thermal characteristics of Al-Si-Cu-Mg foundry alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 617, pp. 654-659, 2014
- [22] S. K. Shaha, F. Czerwinski, W. Kasprzak, J. Friedman, and D.L. Chen, Effect of transition metals on energy absorption during strain-controlled fatigue of an aluminium alloy, *International Journal of Fatigue*, vol. 87, pp. 456-470, 2016
- Materials Transactions A*, vol. 40, no. 3, pp. 702-716, 2009
- [3] A. Pourkamali and E. Alvandi, Finite element and experimental analysis in material characterization of A356 in low cycle fatigue loading, *AJSR - Mechanical Engineering*, vol. 48, no. 2, Summer 2016
- [4] C.T. Wu, S.L. Lee, M.H. Hsieh and J.C. Lin, Effects of Mg Content on Microstructure and Mechanical Properties of Al-14.5Si-4.5Cu Alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 41, no. 3, pp. 751-757, 2010
- [5] S.M. Hirth, G.J. Marshall, S.A. Court and D.J. Lloyd, Effects of Si on the aging behaviour and formability of aluminium alloys based on AA6016, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 319, pp. 452-456, 2001
- [6] B. Skrotzki, G. J. Shiflet and E.A. Starke, On the effect of stress on nucleation and growth of precipitates in an Al-Cu-Mg-Ag alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 27, no. 11, pp. 3431-3444, 1996
- [7] A. W. Zhu, J. Chen, and E. A. Starke, Precipitation strengthening of stress-aged Al-xCu alloys, *Acta Materialia*, vol. 48, no. 9, pp. 2239-2246, 2000
- [8] H. Sehitoglu, T. Foglesong, and H. J. Maier, Precipitate effects on the mechanical behavior of aluminum copper alloys: Part I. Experiments, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 36, no. 3, pp. 749-761, 2005
- [9] A. D. Isadare, B. Aremo, M. O. Adeoye, O. J. Olawale and M. D. Shittu, Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy, *Materials Research*, vol. 16, no. 1, pp. 190-194, 2013
- [10] E. Tan and B. Ogel, Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of AA6066 Alloy, *Turkish Journal of Energy and Environment Science*, vol. 31, pp. 53-60, 2007
- [11] J.F. Li, Z.W. Peng, C.X. Li, Z.Q. Jia, W.J. Chen and Z.Q. Zheng, Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 18, no. 4, pp. 755-762, 2008



## Heat treatment effect on microstructure, mechanical properties and fracture behavior of cylinder head aluminum-silicon-copper alloy

S. Khisheh<sup>1</sup>, K. Khalili<sup>2</sup>, M. Azadi<sup>3\*</sup>, V. Zaker Hendoabadi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran, [khisheh@birjand.ac.ir](mailto:khisheh@birjand.ac.ir)

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran, [khalili@birjand.ac.ir](mailto:khalili@birjand.ac.ir)

<sup>3</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, [m\\_azadi@semnan.ac.ir](mailto:m_azadi@semnan.ac.ir)

<sup>4</sup>Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, [v\\_zaker@ip-co.com](mailto:v_zaker@ip-co.com)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 21 May 2018

Accepted: 17 September 2018

#### Keywords:

Aluminum-silicon-copper alloy

Cylinder head

Heat treatment

Mechanical properties

Design of experiments

### ABSTRACT

In current paper two different regimes of heat treatments, namely 4T and 6T treatments of Al-Si-Cu alloy used in engine cylinder head were investigated and the effects and significance of time and temperature on microstructure and mechanical properties of the material were studied and compared. For this purpose, solution annealing was performed at 490 °C for 5 h. The 6T aging was executed at 180, 200, 220, 240 °C for 1, 3, 5, 7 h. Hardness testing results revealed that the optimum hardness is obtained for 6T at 200°C and 3h, respectively, as the hardness increased. Evaluation of the microstructures and fractured surfaces were performed with optical and scanning electron microscopes. After 6T treatment, tensile strength increased from 245 to 255 MPa and hardness from 88 to 95 Vickers. By applying 6T process in optimized temperature and time, the hardness and tensile strengths of Al-Si-Cu alloy was enhanced from 10.5% compared to that of the 4T processes. The sensitivity analysis indicated that effect of the aging temperature is more significant in comparison to other parameters.



