تاثير عمليات ترمومكانيكى بر مورفولوژى فاز سيليسيم در آلياژهاى Al-Si-Mg

عليرضا همتي[۱] و عباس زارعي هنزكي*[۲]

[۱]دانش آموخته كارشناسي ارشد متالورژى گروه فرآوري مواد فلزى جهاد دانشگاهى فني دانشگاه تهرانACECR

[۲]دانشيار دانشكده مهندسي متالورژي و مواد - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸٤/٦/۹ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۵/۵/۲۸ ، تاريخ تصويب ۸۵/۹/۱۱)

چكيده

خواص مكانيكي آلياژهاي Al-Si-Mg با كنترل مورفولوژي فاز سيليسيم يوتكتيكي در ريز ساختار بهينه مي‌گردند. در چند دهه اخير تحقيقات زيادي جهت بهسازي مورفولوژي فاز سيليسيم از طريق بهسازي شيميائي و عمليات حرارتى صورت پذيرفته است. از آنجائيكه عمليات ترمومكانيكي(TMP) يكي از روش‌هاي مهم فرآوري مواد مي‌باشد، در پژوهش حاضر، تأثير نرخ كرنش و دماى اعمال تغيير شكل بر رفتار كارگرم آلياژ ريختگيA۳۵۶ و تغييرات ريزساختاري مربوطه بررسى شده است. بدين منظور آزمايشهاي فشارگرم در محدودة حرارتي ۳۰۰°C تا ۵۴۰°C و با نرخ كرنش هاي sec^{-1} ۰/۰۰۱ ،sec^{-1} ۰/۰۱ و sec^{-1} ۰/۱ انجام شد. نتايج آزمايش‌ها مبين تغيير مورفولوژي فاز سيليسيم در آلياژ A۳۵۶ از مخلوط تيغه‌اي و سوزني به كروي (قابل مقايسه با فرآيند بهسازي شيميائي) مي‌باشند. همچنين افزايش استحكام و شكل‌پذيري در دماي محيط با افزايش دماي تغيير شكل مشاهده گرديد.

واژه هاي كليدي: آلياژ Al-Si-Mg - بهسازي سيليسيم - عمليات ترمومكانيكي - سيليسيم گلبولي

مقدمه

آلياژهاي Al-Si-Mg بويژه معروفترين آلياژ اين گروه يعنى ۳۵۶، كاربرد گسترده‌اي در صنايع خودروسازي و هوافضا دارند. از جمله دلايل اين كاربردها مي‌توان به مواردي چون نسبت استحكام به وزن بالا، مقاومت به خوردگي مناسب، سياليت و قابليت ريخته‌گري عالي، مقاومت به ترك گرم، قابليت جوشكاري مناسب و همچنين ضريب انبساط حرارتي پائين اشاره نمود[۱]. آلياژ ۳۵۶ بطور معمول داراي ۷/۵-۶/۵% وزنى سيلسيم و ۰/۷-۰/۲۵% وزنى منيزيم بوده و از طريق فرآيندهاي معمول ريخته‌گري توليد مي‌شود. انجماد آهسته اين آلياژ توليد ريزساختار بسيار درشتي مي‌كند كه در آن ساختار يوتكتيكى متشكل از تيغه هاى بزرگ سيليسيم در يك زمينه پيوسته آلومينيمي مشاهده مي گردد.

آلياژهاي داراي اين نوع يوتكتيك بعلت طبيعت ترد صفحات سيليسيم درشت داراي انعطاف پذيري و داكتيليتى پائيني هستند.

آلياژهاى Al-Si-Mg را بعنوان مواد كامپوزيتي مشتمل بر ذرات ناپيوسته و سخت سيليسيم در زمينه نرم آلومينيم با قابليت تغيير شكل بالا، در نظر مي‌گيرند[۳،۲]. خواص مكانيكي اين آلياژها به شكل و اندازه دانه ها، مشخصه هاى دندريتها، اندازه و شكل و نحوه توزيع ذرات فاز دوم (رسوبات) و مورفولوژي فاز سيليسيم يوتكتيك از لحاظ شكل، توزيع و اندازه وابسته است. با كروي شدن ذرات فاز سيليسيم يوتكتيك، خواص مكانيكي اين آلياژها بويژه قابليت تغيير شكل آنها بطور قابل ملاحظه اى بهبود مي‌يابد[۴،۳].

در شرايط معمول انجماد، فاز سيليسيم بصورت تيغه هاى خشن و سوزني شكل مي‌باشد. اين تيغه ها ميتوانند بعنوان مكانهاي جوانه‌زني و اشاعه ترك عمل نموده و باعث تضعيف خواص مكانيكي شوند. فاز سيليسيم در آلياژهاي Al-Si-Mg با مورفولوژي‌هاي مختلفي نظير سوزني، لايه‌اي، كروي و فيبري در ريزساختار ظاهر ميشوند. فرآيند بهسازي سبب تغيير شكل و اندازه ذرات سيليسيم شده و در نتيجه خواص مكانيكي را تغيير خواهد داد. تغيير مورفولوژي سيليسيم از تيغه‌هاي سوزني شكل به رشته‌اي باعث تقويت خواص مكانيكي و بويژه درصد ازدياد طول كل از۷ درصد به ۱۶درصد در آلياژA۳۵۶ شده است [۴،۵]. خواص مكانيكي و رفتار شكست آلياژهاي آلومينيوم

* نويسنده مسئول : تلفن: ۶۱۱۱۴۰۷۲ , فاكس: ۸۸۰۰۶۰۷۶ , Email:zareih@ut.ac.ir

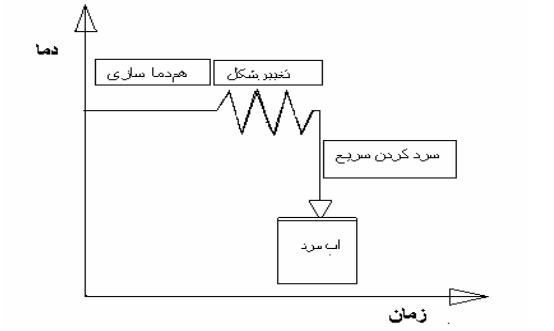
A356 شديدا" وابسته بـه ريزسـاختار آنهـا بـوده و توسـط رسوبات Mg/Si و پراكندگي تيغه‌هاي سيليسيم يوتكتيـك كنترل مي‌شوند. اصولا" در آلياژهاي Al-Si انـدازه و توزيـع تيغه‌هاي سيليسيم در فاز يوتكتيـك مربوطـه بـسيار حـائز اهميت است. در واقع تردي تيغـه‌هـاي Si مـسئول اصـلي خواص مكانيكي ضعيف در اين دسته از آلياژها است[۱]. از آنجاييكه شكل‌پذيري و داكتيليته آلياژهاي Al-Si غالبا" از ساختار ترد يوتكتيك آن‌ها متاثر مي‌گردد، بنابراين مي‌توان با كاهش مقـدار فـاز يوتكتيـك يـا تغييـر مورفولـوژي آن، خواص فوق را بهبود بخشيد.

معمولا براي دستيابي بـه خـواص اسـتحكامي مطلـوب در آلياژهاي ريختگي Al-Si-Mg، از اصلاح روش‌هاي ريختگي براي حذف عيوب و تقويت فاز آلومينيم بـا ايجـاد سـاختار آلـومينيم گلبـولي و روش‌هـاي بهـسازي فـاز سيليـسيم استفاده ميشود. از آنجائيكه عمليات ترمومكانيكي يكـي از روش‌هاي مهم فرآوري مواد مي‌باشـد، در پـژوهش حاضـر، تأثير نرخ كرنش و دماى اعمال تغييـر شـكل بـر تغييـرات ريزساختاري مربوطه و اثرات آن بر خواص مكـانيكي آليـاژ ريختگي۳۵۶A تحت مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

روش انجام آزمايش

در اين تحقيـق از آليـاژ ريختگـي آلـومينيم گـروه ۳۵۶A كه با روش‌هاي متداول ريخته گری شـده اسـتفاده گرديد. تركيـب شـيميائي آليـاژ ۳۵۶A مـورد اسـتفاده در جدول(۱) گزارش شده است.

نمونه‌هاي فشارگرم بر اساس اسـتاندارد ASTM F136-84 به شكل استوانه، با نسبت ارتفاع بـه قطـر۱/۵و ارتفـاع ۱۱ ميليمتر از شـمش‌هـاي فـوق ماشـينكاري شـدند. سـيكل عمليات ترمومكانيكي اعمالي به صورت شماتيك در شـكل (۱) نشان داده شده است. جهت انجام آزمايش‌هـاي فـشار گرم از دستگاه Instron مدل4208 با ماكزيمم بار ۳۰ تـن مجهز به كوره استفاده شد. اين دستگاه مجهز بـه سيـستم كامپيوتري جهت دريافت داده‌هاي نيرو بر حسب جابجائي است. ابتدا نمونه‌ها وارد كورهٔ دستگاه فشار گرم شـده و در درجـه حـرارت‌هـاي مـورد آزمـايش(۳۰۰°C، ۳۴۰°C ،.و ۵۴۰°C) به مدت ۱۰ دقيقـه در شـرايط مـشابه نگهـداري شدند، سـپس تغييرشـكل بـا نـرخ كرنـشهاي مـورد نظـر (۰/۱ sec-1و 1 sec-1،۰/۰۱ sec-1،۰/۰۰۱) اعمال گرديد.



شكل ۱ : شماتيك سيكل آزمايش فشار گرم.

در نهايت براي بررسي تغييرات ساختاري صـورت پذيرفتـه در دماي تغيير شكل، نمونـه‌هـا در آب كـوئنچ شـدند. بـه منظور بررسي اثر فرايند ترمومكانيكي و پارامترهـاي مـؤثر بر آن بر خواص مكانيكي، از بخش مياني نمونه‌هـاي فـشار گرم، ورق هاي نازك (حدود ۳۰۰µm) تهيه و آزمايش پانچ برشي بر روي اين نمونه ها صورت پذيرفت. بـا اسـتفاده از نتايج اوليه آزمايشهاي پانچ (منحني‌هاي نيـرو بـر حـسب جابجـايي) و بـا بكـارگيري روابـط ارائـه شـده در مراجـع، پارامترهاي استحكام نهايي(UTS) و ازديـاد طـول كـل تـا شكست(El)، محاسبه گرديدند[۶]. مطالعات ريزسـاختاري توسط ميكروسكوپ نوري و آناليز تصويري پس از حكـاكي در محلول۰/۵% حجمی اسيد فلوريـدريك (HF) و محلـول Keller صورت پذيرفت.

بايد خاطر نشان شود كه جهت بررسي و مقايسه اثـر نـرخ كرنش و دماي تغيير شكل بر خرد شـدن ذرات سيليـسيم در آلياژهاي مورد استفاده، ازمركز نمونـه‌هـا بعـد از تغييـر شكل تصاوير ريز ساختاري تهيه گرديد. به منظور بررسـي كمي و كيفي فازهای حاضر در ريز سـاختارهای حاصـله از تحليل گر تصويري استفاده شد.

جدول ۱: تركيب شيميائي آلياژ مورد استفاده (درصد وزني).

Wt%	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ti	Zn	Ni
A 356	7.20	0.40	0.24	0.03	0.01	0.20	0.02	0.01

نتايج و بحث

ريز ساختار اوليه

آلياژ ريختگي A۳۵۶ در دسته آلياژهاي سه تايي آلومينيم- سيلسيم- منيزيم (Al-Si-Mg) قرار دارد. اين آلياژ در حالت ريختگي شامل يك فازگسترده دندريتي آلومينيم آلفا و فاز دوم شامل ناحية انجمادي يوتكتيك است(شكل۲). ناحية يوتكتيك شامل تيغه‌هاي سيليسيم و رسوب‌هاي Mg2Si، α-AlFeSi و β-AlFeSi در زمينة آلومينيم مي‌باشد[۵،۲].

شكل (۲) ريز ساختار آلياژ A۳۵۶ را نشان مي‌دهد. همانطور كه مشاهده مي‌شود در اين حالت ساختار متشكل از فاز آلومينيم آلفا (زمينه) و تيغه‌هاي بزرگ و سوزني شكل سيليسيم مي‌باشد كه بدون جهت‌گيري خاص در زمينه آلومينيمي توزيع شده است.

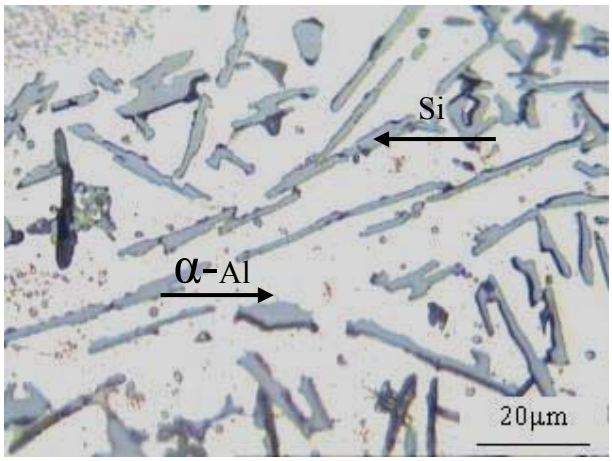
اثر دماي تغيير شكل بر مورفولوژي سيليسيم

يک نمونه از ريزساختارهای آلياژ A۳۵۶، پس از تغيير شكل در دماهاي ۴۲۰°C تا ۵۴۰°C با نرخ كرنش ۰/۰۰۱ sec^{-1} تا كرنش متناظر ۰/۶ در شكل (۳) ارائه شده است.

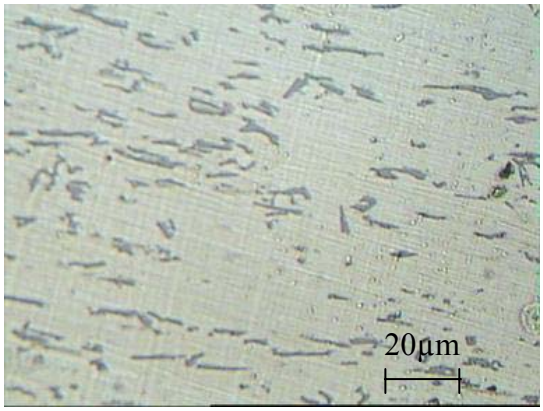
همانطور كه در شكل(۲) ديده مي‌شود در حالت اوليه ساختار يوتكتيكي بصورت سوزني و شامل صفحات درشت فاز سيليسيم مي‌باشد. با ازدياد دماي تغيير شكل، متوسط تعداد ذرات سيليسيم بر واحد سطح $(\mu m)^{۲}$ افزايش يافته و متوسط اندازه آنها بر واحد سطح $(\mu m)^{۲}$ كاهش نشان مي‌دهند.

بررسي‌هاي صورت گرفته توسط ميكروسكوپ الكتروني نيز مبين اين نكته مي‌باشند كه افزايش دما بر روي تعداد و اندازه ذرات مؤثر بوده و شكل آنها را تحت تاثير قرار مي‌دهد(شكل۴).

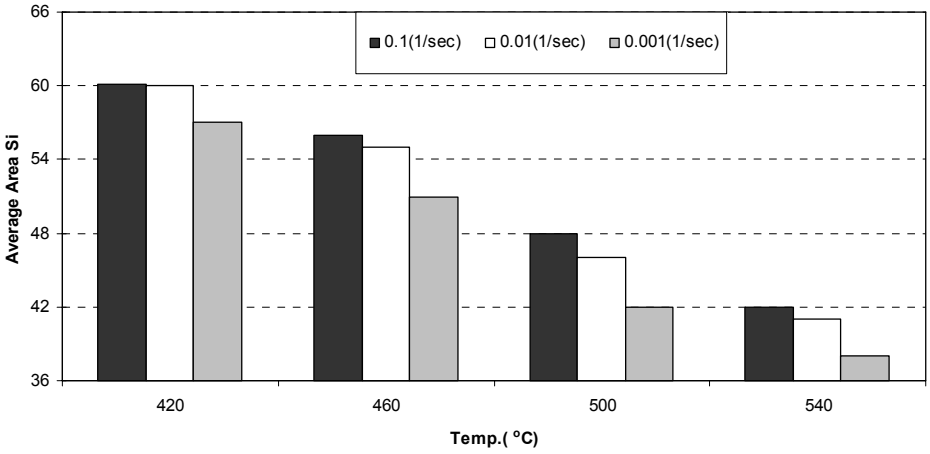
بنابراين تاثير دماي تغيير شكل بر ميزان خرد شدن ذرات سيليسيم كليدي مي‌باشد. اين تغيير در مشخصات ريزساختاري مبين تغيير مورفولوژي از حالت تيغه‌اي به شكل كروي مي‌باشد.



شكل۲ : ريزساختار آلياژA۳۵۶ در حالت ريختگي، اچ شده توسط محلول ۰/۵ درصدHF.
تيغه های سيليسيم (Si)- آلومينيم آلفا (α-Al)



شكل۳ : اثر دما برمورفولوژي فاز سيليسيم در آلياژ A۳۵۶، نرخ كرنش sec^{-1} ۰/۱، مقدار كرنش ۰/۶ و دماي تغيير شكل T =۵۴۰ °C .



شكل۴ : تغييرات متوسط مساحت فاز سيليسيم بر واحد سطح $(\mu m)^2$ با دما در نرخ كرنش‌هاي گوناگون و در كرنش متناظر ۰/۶.

اثر نرخ كرنش بر مورفولوژي سيليسيم

نرخ كرنش از جمله پارامترهاي ترمومكانيكي است كه در مكانيزم گلبولي شدن ذرات خرد شدهٔ سيليسيم از اهميت ويژه‌اي برخوردار است. نتايج آناليز تصويري مبين كاهش متوسط مساحت بر واحد سطح $(\mu m)^2$ (كاهش قطر) ذرات سيليسيم با كاهش نرخ كرنش در تمام نمونه‌ها مي‌باشد(شكل۴). چنين استنباط مي‌شود كه در نرخ كرنش‌هاي كم اين امر تشديد شده است. از آنجائيكه در پديده‌هاي كنترل شونده توسط نفوذ (مانند گلبولي شدن فاز سيليسيم) زمان عاملی بسيار مهم مي‌باشد در نرخ كرنش‌هاي زياد كه زمان براي نفوذ سيليسيم به اندازه كافي در دسترس نمي‌باشد سينتيك گلبولي شدن در كرنش متناظر يكسان كاهش مي‌يابد. با توجه به شكل(۴) اين اثر در تمام دماها براي آلياژ مورد استفاده قابل مشاهده مي‌باشد.

تحليل مكانيزم‌هاي مؤثر در تغييرات ريزساختاري

شكل‌های(۲) و (۳) ريزساختارهای آلياژA۳۵۶ قبل از تغيير شكل و بعد از آن را نشان مي‌دهد. مدل‌هاي گوناگوني در تحقيقات گذشته براي كروي شدن ذرات فاز دوم در آلياژهاي يوتكتيك ارائه شده است. از ميان آنها مدل Kraft و Graham در كروي شدن ساختارهاي تيغه‌اي در آلياژهاي يوتكتيك آلومينيم به واقعيت نزديكتر مي‌باشد[۸]. در اين مدل فرض بر اين است كه عيوب موجود در ساختار عوامل مهمي در كروي شدن ساختارهاي لايه لايه مي‌باشند. بر اين اساس در محل عيوب نظير حفره‌ها و لبه‌هاي تيز، شعاع انحناء و گراديان شيميائي بيشتر بوده و در واقع كروي شدن در اين مناطق شروع مي‌شوند(شكل۵).

نيروي محركه لازم براي كروي شدن طبق اين مدل ناشي از گراديان پتانسيل شيميائي بين محل عيوب با نواحي مجاور عيوب مي‌باشد و اتم‌ها از محل عيوب به سمت صفحات مجاور حركت كرده و در نتيجه اين انحلال و الحاق مجدد اتم‌ها به ذرات مجاور، فرآيند كروي شدن صورت مي‌پذيرد[۸].

در تحقيق حاضر عيوب لازم براي عملي شدن فرآيند كروي شدن از طريق اعمال كرنش بر روي آلياژ حاصل مي‌گردد. به نظر ميرسد كه در اثر اعمال تغيير شكل در دماي بالا تيغه‌هاي سيليسيم ابتدا بصورت مكانيكي شكسته شده‌اند و در ادامه با كنده شدن اتم‌هاي سيليسيم از لبه‌ها و نفوذ به نقاط ديگر، ذرات سيليسيم به شكل گلبولي (از مورفولوژي تيغه‌اي به كروي) در مي‌آيند. بر اساس مكانيزم فوق و با توجه به اينكه فرآيند كروي شدن يك فرآيند تحريك شونده توسط حرارت (Thermally Activated Process) مي‌باشد كاهش نرخ كرنش و افزايش دما، نيروی محركه كروي شدن را افزايش مي‌دهد. نتايج بدست آمده براي آلياژ A۳۵۶ بيانگر كاهش متوسط مساحت ذرات سيليسيم در واحد سطح $(\mu m)^2$ با افزايش دماي تغيير شكل است. همچنين با كاهش نرخ كرنش متوسط مساحت ذرات سيليسيم در واحد سطح $(\mu m)^2$ كاهش يافته است. دليل اين امر به افزايش سينتيك نفوذ نسبت داده مي‌شود. در نرخ

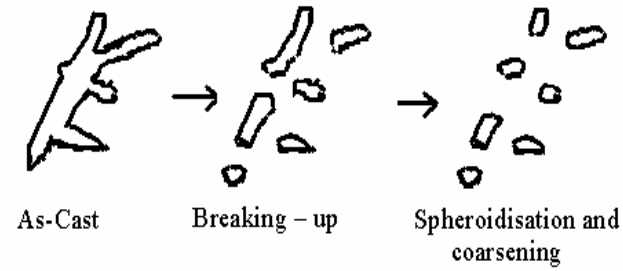
كرنش‌هاي كم زمان بيشتري براي نفـوذ اتـم‌هـا در حـين تغيير شكل در دسترس خواهد بود[۸].

اثرپارامترهاي ترمومكانيكي بر خواص مكانيكي نهائي

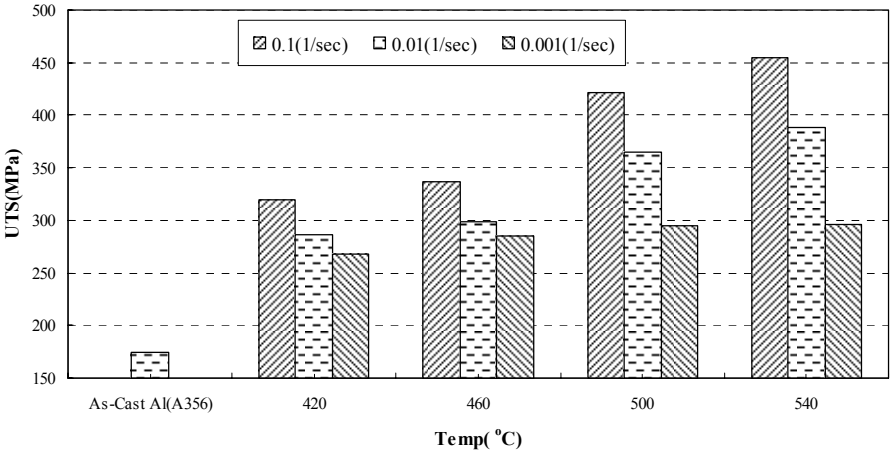
اثر دما

در شكل (۷)، اثر فرآيند ترمومكانيكي تحـت شـرايط مختلف حرارتي بر اسـتحكام نهـايي آليـاژ مـورد اسـتفاده نشان داده شده است. همانطور كه مـشاهده مـي‌شـود، بـا افزايش دماي اعمال كرنش و نرخ كرنش، اسـتحكام نهـائي آلياژهاي آلومينيمي افزايش يافته است. بيشترين استحكام نهائي در نمونه تغيير شكل داده شده در دمـاي ۵۴۰ °C و نرخ كرنش ۰/۱ sec-1 بدست آمده است.

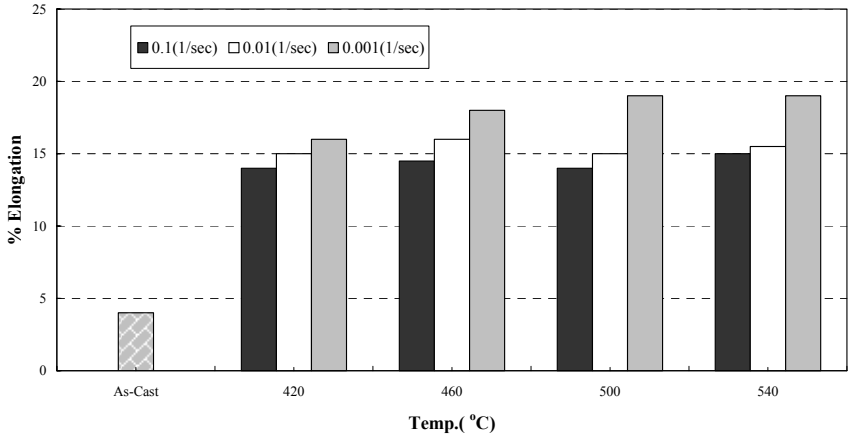
افزايش خواص مكانيكي با افزايش دمای تغييـر شـكل بـه تاثير عمليات ترمومكانيكی بر مكانيزم های سخت گردانـی (ماننـد محلـول جامـد و رسـوب گـذاری بعـدی) و تغييـر مورفولوژی سيليسيم نسبت داده می شود.



شكل۵ : شماتيك خرد وكروي شدن تيغه های سيليسيم در حين تغيير شكل.



شكل ۶ : تغييرات استحكام نهائي با دماي تغيير شكل در آلياژ A۳۵۶.



شكل ۷: تغييرات درصد ازدياد طول كل تا شكست با نرخ كرنش در دماهاي متفاوت در آلياژA۳۵۶.

اثر نرخ کرنش بر خواص مکانیکي

مکانیزم‌هاي فعال شونده با حرارت تابع زمان بوده و در نتیجه رفتار مواد در دماهای بالا تابع کافي بودن یا نبودن زمان براي وقوع این فرآیندها است. با افزایش نرخ کرنش چگالي نابجائي‌هاي تولید شده افزایش یافته استحکام بخشي از طریق تشکیل زیرساختارهاي فرعي تشدید مي‌شود. همانطور که مشاهده مي‌گردد، در تمامي نمونه‌ها با افزایش نرخ کرنش مقدار استحکام نهائي افزایش یافته است(شکل۶).

همانطور که قبلا اشاره شد در نرخ کرنش‌هاي زیاد که زمان براي نفوذ سیلیسیم به اندازه کافي در دسترس نمي‌باشد سینتیك گلبولي شدن در کرنش متناظر یکسان کاهش مي‌یابد. این اثر در تمام دماها براي آلیاژهاي مورد استفاده با توجه به درصد ازدیاد طول کل تا شکست (شکل۷) قابل مشاهده است.

نتیجه گیري

۱- در اثر اعمال تغییر شکل در دماي بالا در تمام نمونه‌هاي مورد آزمایش تیغه‌هاي سیلیسیم ابتدا بصورت مکانیکي شکسته شده و در ادامه تغییر شکل با نفوذ اتم‌هاي سیلیسیم از لبه‌هاي شکسته شده به نقاط دیگر فاز سیلیسیم، مورفولوژي سیلیسیم تغییر کرده از تیغه‌اي به شکل گلبولي در آمده است.

۲- با افزایش دماي تغییر شکل مقدار استحکام نهائي و ازدیاد طول کل تا شکست افزایش یافته است.

۳- با افزایش نرخ کرنش مقدار استحکام نهائي افزایش و ازدیاد طول کل تا شکست کاهش یافته است.

۴- حداکثر مقدار ازدیاد طول کل تا شکست مربوط به حداکثردما (۵۴۰°C) در تمامي نمونه‌ها تقریبا مطابق با کمترین نرخ کرنش($0/001\ sec^{-1}$) مي‌باشد.

۵- حداکثر استحکام نهائي مربوط به حداکثردما (۵۴۰°C) در تمامي نمونه‌ها تقریبا مطابق با بیشترین نرخ کرنش($0/1\ sec^{-1}$) مي‌باشد.

مراجع

1 - Polmear, I. J. (1989). *Light Alloys Aluminum, Magnesium, Titanium*, 2nd ed., Routledege, Chapman and Hall Inc., New York, PP. 18-169.

2 - Gruzleski, J. E. and Closset, B. M. (1990). "The treatment of liquid Al-Si alloy." *Internal Report,* The AFS Inc., PP. 13-21.

3 - *Casting, Metals Handbook,* 9th Edition, American Society for Metals Park, Ohio, Vol. 15, PP. 327-338.

4 - Cerri, E. and Evangelista, E. (2000). "Effects of thermal treatments on microstructure and mechanical properties in a thixocast 319 aluminum alloy." *Materials Science and Engineering*, Vol. A84, PP. 254-260.

5 - Hatch, J. E. (1984). *Aluminium Porperties and Physical Metallurgy,* American Society for Metals Park, Ohio.

6 - Zarei Hanzaki, A. (1994). *Tranformation Characterristics of Si-Mn TRIP Steels After Thermomechanical Processing*. PHD Thesis, McGill University, Montral, Canada.

7- Sigworth, G. K., Shivkumar, S. and Apelian, D. (1989). "The treatment of molten metal processing on mechanical processing of cast Al-Si-Mg alloys." *AFS Transaction,* Vol. 97, PP. 311-320.

8 - Tian, Y. L. and Kraft, R. W. (1987). "Mechanism of pearlite of spherodization." *Metallurgical and Material Transaction A,* Vol. 18, PP. 1987-1403.

9 - Hemmati, A., Zarei Hanzaki, A. and Araei, A. (2003). "An investigation to hot working behaviour of althix (A356) an Al(A356)." *42th.Annual Conference of Metallurgists of CIM Vancouver*, British Columbia Canada, PP.423-434.

10 - Gacetnier, J. and Samuel, F. H. (1995). "Tensile properties and fracture behavior heat-treated 319 Al automotive." *AFS Transaction,* Vol. 103, PP. 849-857.

11 - Caceres, C. H. and Griffiths, J. R. (1996). "Damage by cracking of silicon particles in an Al-7Si-0.4Mg casting alloy." *Acta Material,* Vol. 44, No. 1, PP. 25-33.