

اثر همگن سازی بر رفتار آنیل ورق آلومینیوم آلیاژی AA ۸۰۱۱

مهرداد آقایی خفری

دانشجوی دکتری گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

رضا محمودی

دانشیار گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۶/۹/۱۱، تاریخ تصویب ۷۷/۸/۹)

چکیده

در تحقیق حاضر اثر همگن سازی بر رفتار آنیل ورق آلومینیوم آلیاژی AA ۸۰۱۱ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که همگن سازی در آلیاژ فوق موجب کاهش دمای تبلور مجدد و کاهش تمایل به تبلور مجدد پیوسته می‌گردد. برهم کنش فرآیندهای رسوب گذاری و تبلور مجدد با استفاده از روش گرماسنجی دینامیک^(۱) DSC مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر اندازه و فاصله بین رسوبات بر روی پدیده فوق تحقیق شده است.

کلید واژه‌ها: همگن سازی، آنیل، گرماسنجی DSC، تبلور مجدد، AA ۸۰۱۱، آنالیز تصویری، خواص مکانیکی، رسوب گذاری، آلومینیوم

مقدمه

کاهش ضخامت) و همچنین تاثیر آنیل میانی بر کاهش اثر مذکور را مورد بررسی قرار داده است. از طرف دیگر Oscarson و همکاران [۶] تمایل به تبلور مجدد پیوسته در ورقهای نوردی همگن نشده AA ۸۰۱۱ (۹۸٪ کاهش ضخامت) را گزارش نموده‌اند. در این گزارش پدیده تبلور مجدد پیوسته بر خلاف نظریات مرسوم، به قفل شدن ریز دانه ها توسط رسوبات و جدا شدن تدریجی آنها در اثر درشت شدن ذرات رسوبی نسبت داده نشده است. در تحقیق حاضر، آلیاژ AA ۸۰۱۱ با ترکیب شیمیایی مشابه موارد فوق مورد بررسی قرار گرفته، حاصل این بررسی بخشی از نتایج گزارش شده قبلی را تایید نموده و علاوه بر آن، ویژگیهای جدیدی را در این آلیاژ نمایان ساخته است.

روش تحقیق

در آزمایشهای مختلف از تسمه های ریخته شده (Strip - Cast) با ترکیب شیمیایی به شرح جدول (۱) استفاده گردید. به منظور بررسی اثر همگن سازی،

آلیاژ AA ۸۰۱۱ به عنوان یکی از اعضاء گروه ۸۰۰۰ آلیاژهای آلومینیوم به منظور جایگزینی آلیاژهای گروه ۱۰۰۰ مورد توجه قرار گرفته است. مکانیزم مقاوم شدن در این آلیاژ عملیات حرارتی ناپذیر، ناشی از حضور ذرات (رسوبات $FeAl_3$ یا ترکیبات کمپلکس $FeAlSi$) پراکنده در ساختار می باشد [۲،۱]. آنچه که این آلیاژ سخت شونده توسط ذرات^(۲) را از آلیاژهای گروه ۱۰۰۰ متمایز می‌سازد، قابلیت تغییر شکل بالا و خواص مکانیکی مطلوب در آن است. این ویژگیها موجب گشته تا این آلیاژ در زمینه مصارف فویل و ورقهای نازک با استقبال گسترده‌ای روبرو شود. آلیاژ AA ۸۰۱۱ به دلیل کاربردهای متنوع صنعتی [۴،۳]، برهم کنش فرآیندهای تبلور مجدد و رسوب گذاری در طی آنیل [۵] و ساختار متالورژیکی منحصر به فرد [۶] مورد بررسی محققین قرار گرفته است. در این ارتباط نحوه توزیع و فاصله بین ذرات، همگن سازی و آنیل به عنوان پارامترهای کنترل کننده خواص آلیاژ مطرح شده‌اند. تحقیقات C. Garcia Cordovilla و Louis [۵] اثر رسوب گذاری بر تبلور مجدد ورقهای نورد شده (۸۵٪

ورقهای نوردی بریده شده بودند انجام شد. در آزمایشهای گرماسنجی، نمونه شاهد از جنس آلومینیوم با خلوص بالا انتخاب شد. مقادیر دانسیته کسر حجمی، و فاصله بین ذرات در نمونه ها براساس نتایج آنالیز تصویری محاسبه گردید. آنالیز تصویری با استفاده از دستگاه آنالیز تصویری Cambridge و در بزرگنمایی ۲۰۰۰ انجام گرفت.

بمنظور مقایسه رفتار آنیل نمونه های آلیاژ AA۸۰۱۱ و AA ۸۰۷۹ ابتدا تسمه های ریخته گری شده آلیاژ AA ۸۰۷۹ (۰/۲ %Si و ۱% Fe) در شرایط مشابه با آلیاژ AA ۸۰۱۱ نورد شدند. سپس نمونه های کششی تهیه شده از ورقهای آلیاژی در دمای ثابت ۲۰۰ °C آنیل شدند.

برای نشان دادن شرایط نمونه ها و عملیات حرارتی انجام شده بر روی آنها از علائم اختصاری H (همگن شده) و U (همگن نشده) استفاده گردیده و پس از این علائم دمای آنیل ذکر شده است.

نتایج و بحث

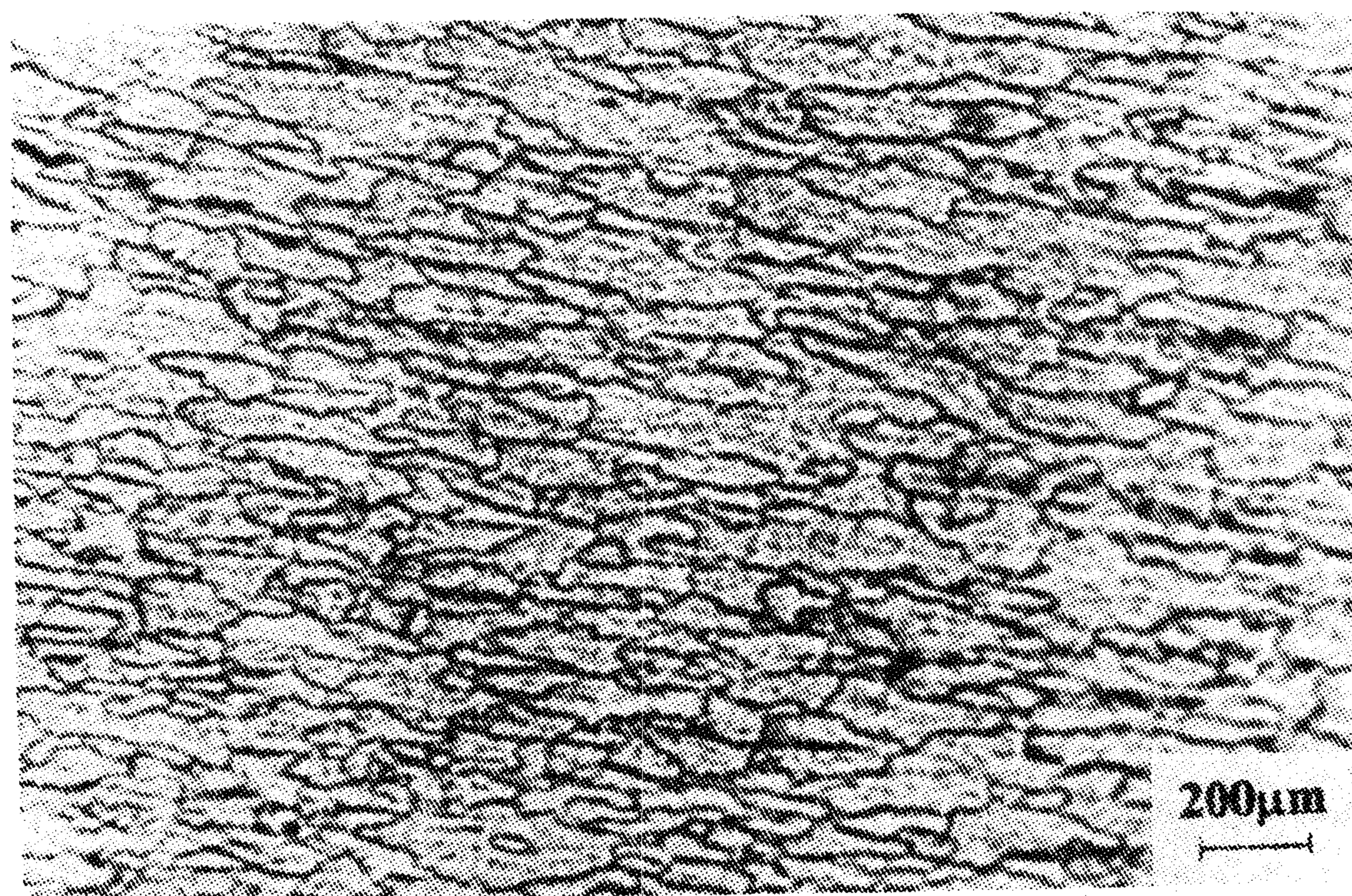
شکلهای (۱) و (۲) به ترتیب ساختار آلیاژ AA ۸۰۱۱ پس از ریخته گری و پس از نورد و آنیل را نشان می دهند. منحنی های تنش - کرنش مهندسی مربوط به نمونه های آنیل شده در شرایط متفاوت در شکل (۳) آورده شده است.

تعدادی از تسمه های ریخته گری شده به مدت هشت ساعت در دمای ۵۷۰ درجه سانتیگراد تحت عملیات همگن سازی قرار گرفتند. نمونه ها پس از گذشت زمان مذکور در کوره سرد شدند. سپس تسمه های همگن شده به همراه سایر تسمه های عادی با استفاده از دستگاه نورد دو غلطکی نورد شدند. کاهش ضخامت از هشت میلیمتر به ۰/۸ میلیمتر، و در طی پاسهای متعدد و بدون آنیل میانی صورت گرفت. در مرحله بعد نمونه های کششی با طول سنج ۵۰ میلیمتر مطابق با استاندارد ASTM B ۵۵۷M از ورقهای نوردی بریده شده و تحت عملیات آنیل آهسته قرار گرفتند. سرعت گرمایش در این نوع آنیل ۴۰ °C/h و محدوده دمایی آنیل ۱۵۰ °C تا ۴۰۰ °C و زمان نگهداری نمونه ها در دمای آنیل دو ساعت بوده است. همچنین بعضی از نمونه ها در شرایط حمام نمک خنثی در دمای ۳۰۰ °C و به مدت ۱۵ دقیقه تحت عملیات آنیل سریع قرار گرفتند.

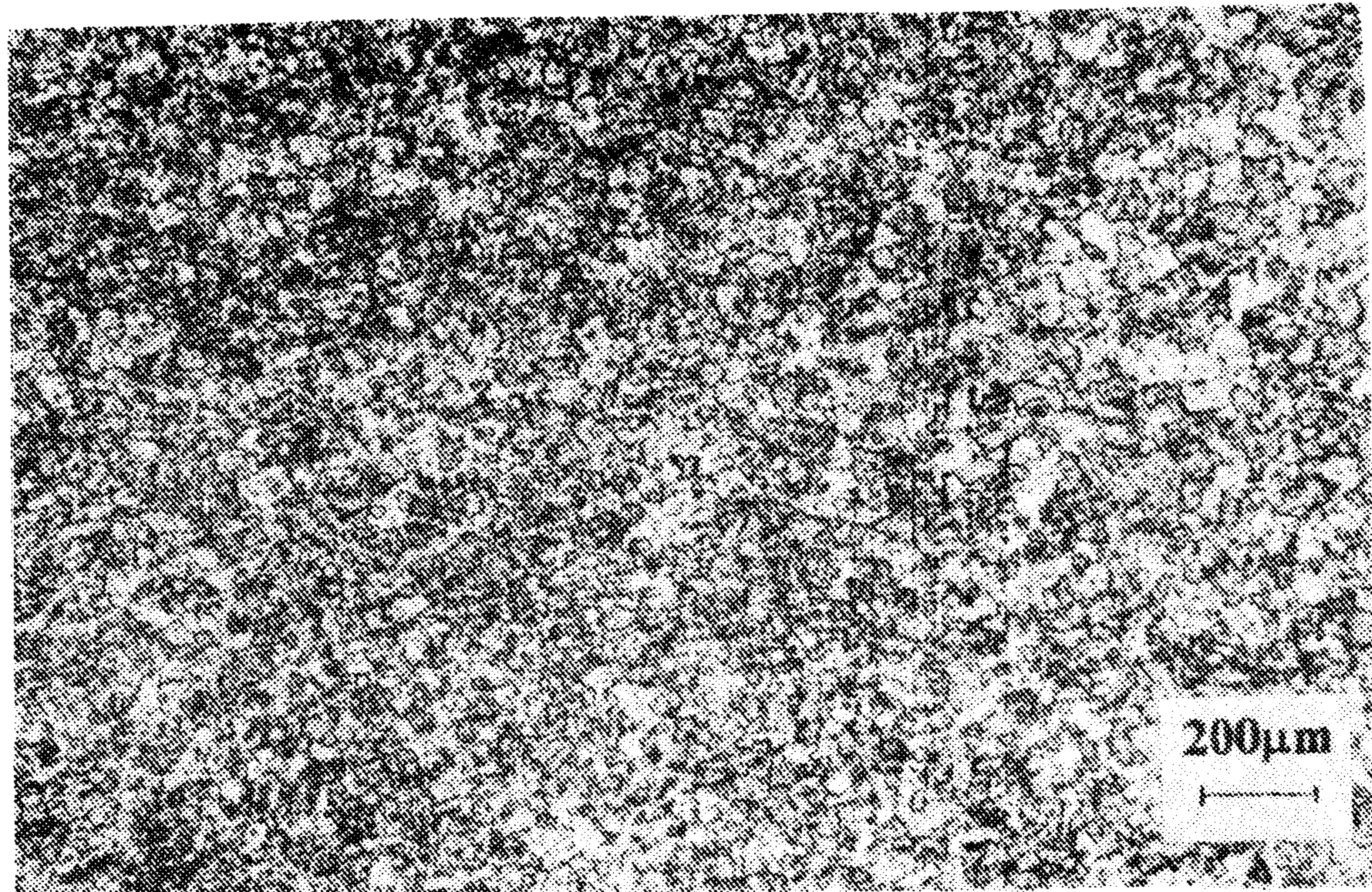
جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ.

عنصر	Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Ti	Al
درصدوزنی	۰/۵۹۰	۰/۸۳۰	۰/۰۲۵	۰/۰۱۰	۰/۰۵۰	۰/۰۲۰	بقیه

بررسی گرماسنجی دینامیک با استفاده از دستگاه DSC از نوع Perkin-Elmer و بر روی نمونه های با وزن پنج میلی گرم که با استفاده از روش ماشینکاری اسپارک از

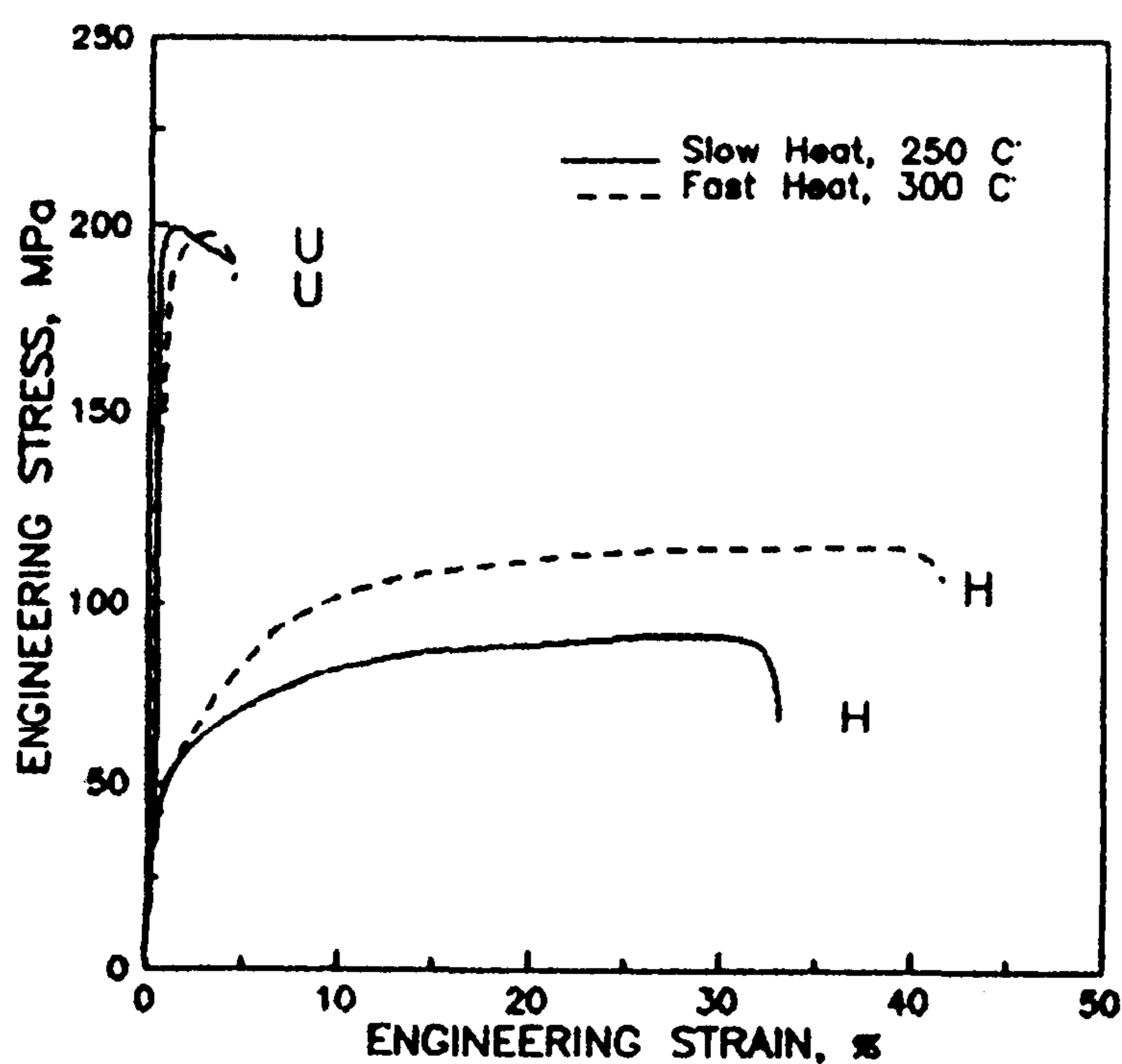


شکل ۱: تصویر متالوگرافی نوری نمونه ریخته گری.



شکل ۲: تصویر متالوگرافی نوری نمونه آنیل آهسته U300.

توسعه داده است.



شکل ۳: منحنی های تنش کرنش مهندسی برای نمونه های مختلف.

شتاب یافتن و یا کند شدن تبلور مجدد در آلیاژهای آلومینیوم باتوجه به فاصله بین رسوبات [۸،۷] و تقدم و یا تاخر فرآیندهای رسوب گذاری و تبلور مجدد [۹] بررسی شده است. در عین حال در سالهای اخیر جوانه زنی تحریک شده توسط ذرات، $PSN^{(۱)}$ و همچنین مفاهیم تبلور مجدد پیوسته و یا بازبازی گسترش یافته (۲) نیز مورد

نمونه همگن شده برخلاف سایر نمونه های همگن نشده در هر دو شرایط آنیل آهسته و آنیل سریع، قابلیت انعطاف بالا و استحکام پایینی را ارائه مینماید. اختلاف رفتار تبلور مجدد نمونه های همگن شده و همگن نشده باتوجه به منحنی های افت استحکام در شکل (۴) به صورت دقیق تری مشخص می گردد. نمونه های همگن شده استحکام پایین تری داشته و افت استحکام تسلیم در آنها به صورت ناپیوسته تری اتفاق می افتد. چنانکه ملاحظه می گردد، نمونه های همگن نشده تبلور مجدد پیوسته را به صورت بارزتری نمایان می سازد. تفاوت استحکام تسلیم نمونه ها را میتوان باتوجه به تفاوت دمای تبلور مجدد در نمونه های همگن شده و همگن نشده و تاثیر پارامترهای اندازه دانه اولیه و مورفولوژی رسوبات بر دمای تبلور مجدد توضیح داد. در نمونه های همگن نشده، رسوبات حالت خوشه ای و به هم پیوسته داشته، شکل (۵ - الف)، و در نمونه همگن شده، شکل (۵ - ب)، رسوبات بصورت پراکنده در ساختار توزیع شده اند. اگر چه اندازه دانه بزرگتر نمونه های ریخته گری و همگن شده می بایست دمای تبلور مجدد را در نمونه های نورد و آنیل شده افزایش دهد، ولی نتایج نشان می دهند که همگن سازی در این آلیاژ منجر به کاهش دمای تبلور مجدد گردیده و تبلور مجدد ناپیوسته را

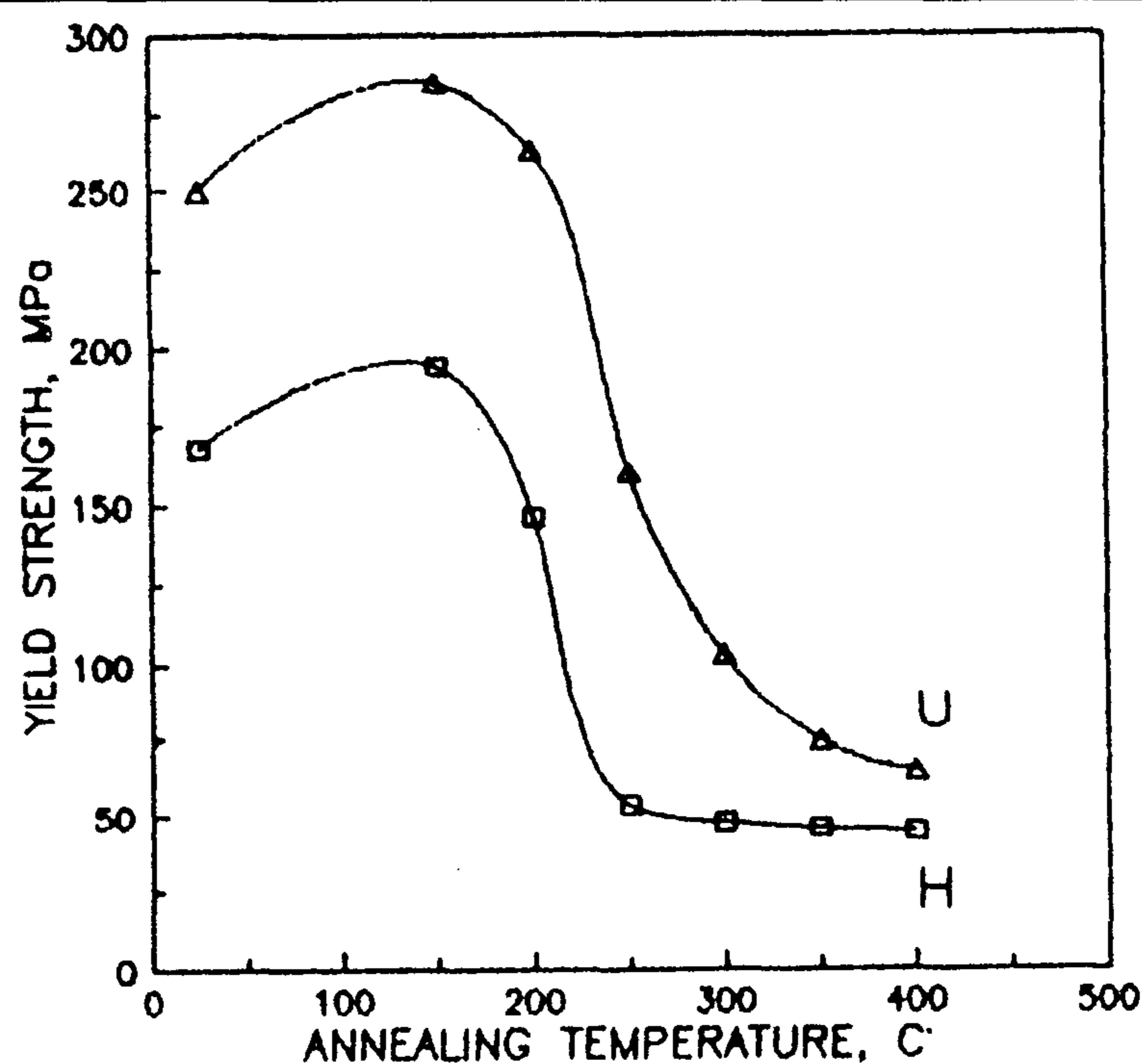
در این رابطه (ΔS) فاصله مرکز به مرکز تا نزدیک ترین همسایه، F_v کسر حجمی ذرات و r شعاع ذره می باشد. چنانکه ملاحظه می گردد مقدار فاصله بین ذرات به مراتب بزرگتر از مقدار بحرانی (4μ) لازم جهت شتاب دهی تبلور مجدد در آلیاژهای Al-Fe بوده [۸] و می بایست اثری شتاب دهنده را بر تبلور مجدد نمونه ها اعمال نمایند. اثر ذرات فاز دوم بر تبلور مجدد را با توجه به قطر متوسط ذرات و نسبت کسر حجمی ذرات موجود به شعاع ذرات نیز مورد ارزیابی قرار می دهند [۱۰]. براساس نتایج ارائه شده در جدول (۲) مقدار متوسط قطر ذرات در هر دو حالت همگن شده و همگن نشده بزرگتر از مقدار بحرانی 4μ است و نسبت کسر حجمی به شعاع ذره (F_v/r)، نیز حدود $0.04\mu^{-1}$ می باشد. لذا با توجه به مقادیر محاسبه شده پیش بینی می شود که ذرات موجود در ساختار نمونه ها اثری شتاب دهنده را بر فرآیند تبلور مجدد اعمال نمایند. براساس نتایج بدست آمده فوق تفاوت رفتار تبلور مجدد در نمونه های همگن شده و همگن نشده را نمی توان به نحو رضایت بخشی با توسل به اختلاف اندازه و یا فاصله بین ذرات در نمونه ها توضیح داد.

توجه قرار گرفته است. مقادیر محاسبه شده فاصله بین ذرات (ΔS) در جدول (۲) با توجه به رابطه زیر محاسبه شده است [۷]:

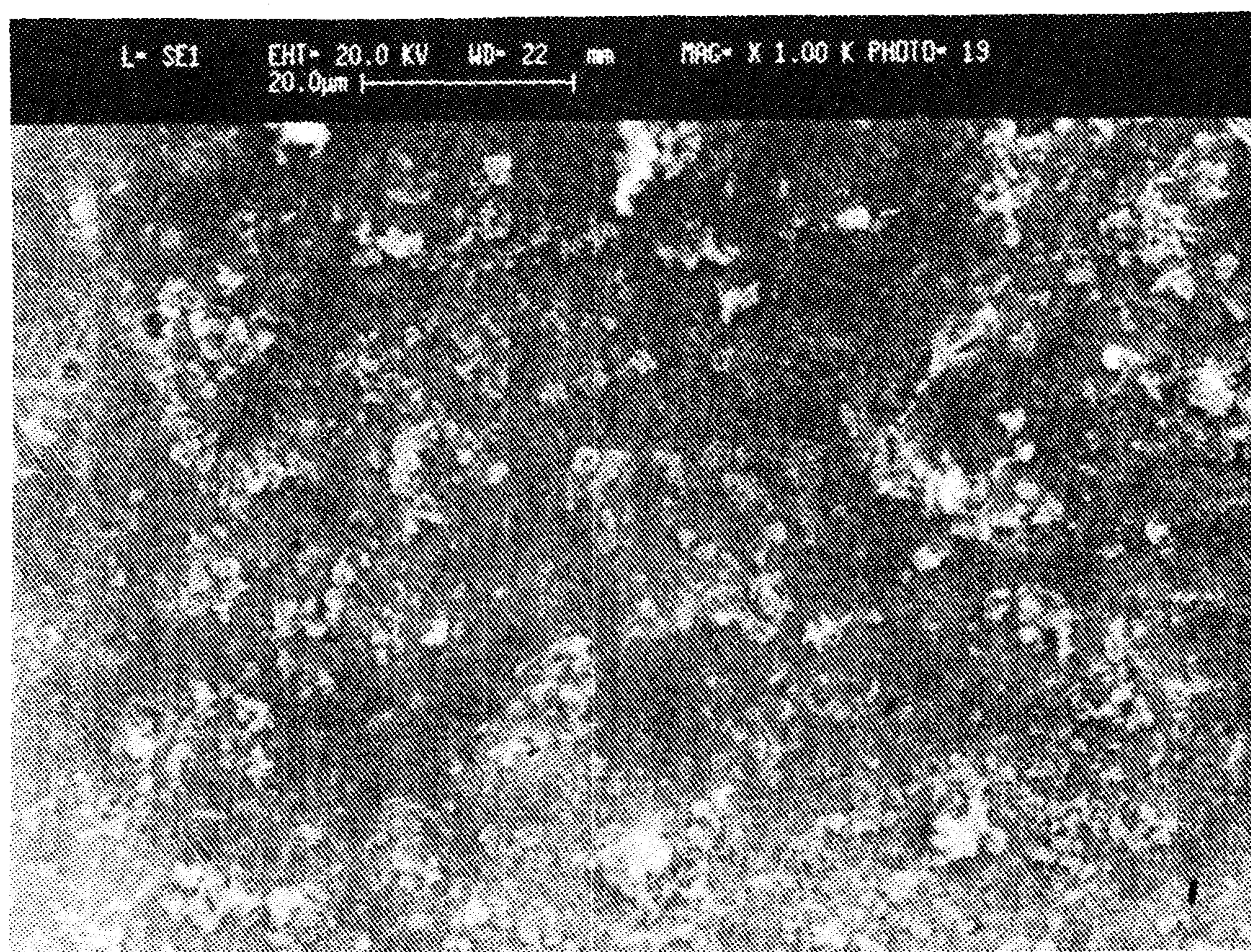
$$\Delta S = 2r (1/F_v)^{1/3} \quad (1)$$

جدول ۲: نتایج حاصل از آنالیز تصویری نمونه ها.

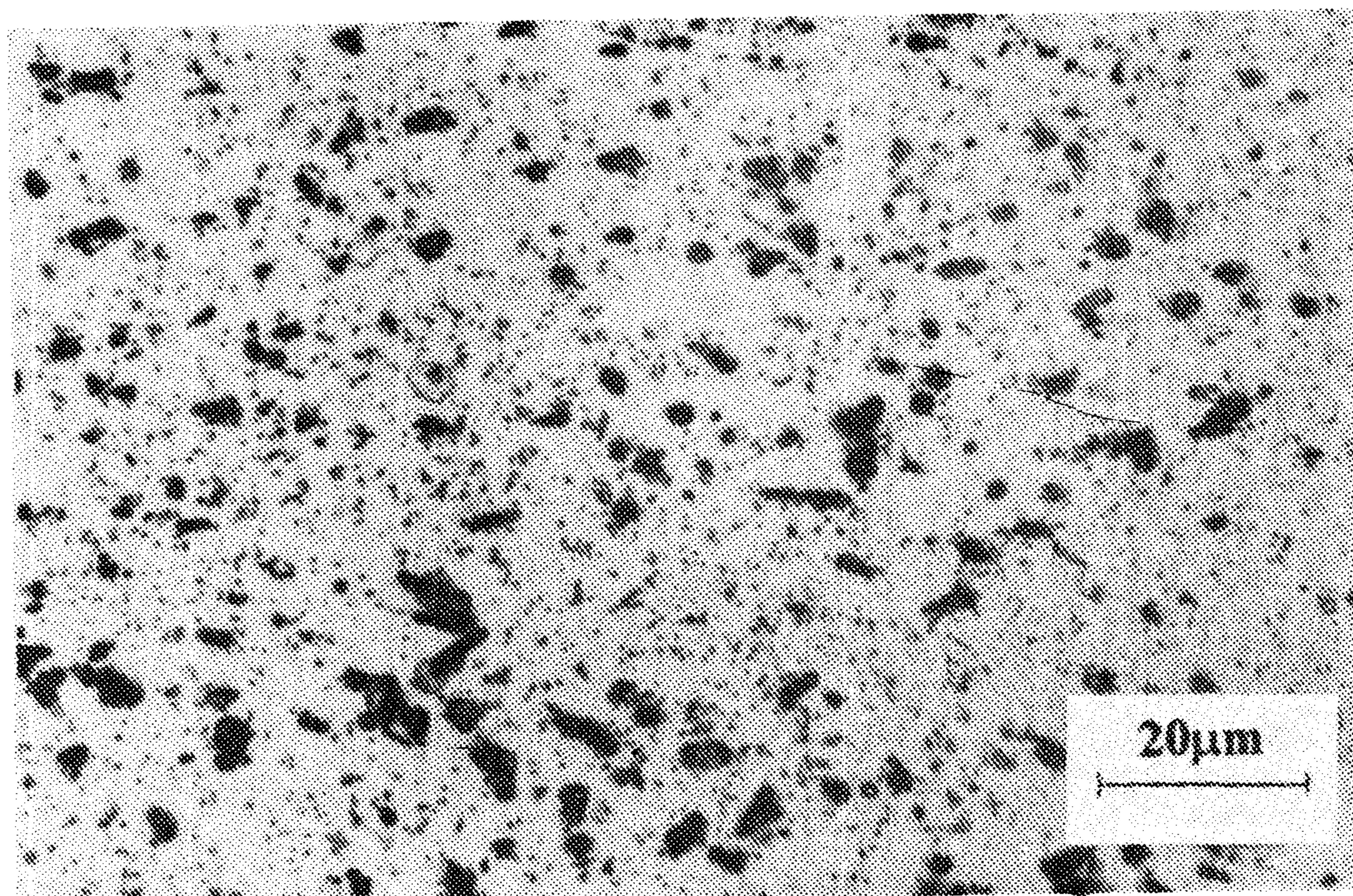
آلیاژ	قطر ذرات μm	F_v	F_v/r μm^{-1}	ΔS μm
همگن شده	۲/۵	۰/۰۵۹	۰/۰۴۷	۶/۴۵۷
همگن نشده	۲/۷	۰/۰۵۴	۰/۰۴۰	۷/۱۹۶



شکل ۴: تغییرات استحکام تسلیم با تغییر دمای آنیل.



شکل ۵ - الف: تصویر متالوگرافی SEM مربوط به نمونه ریخته گری.

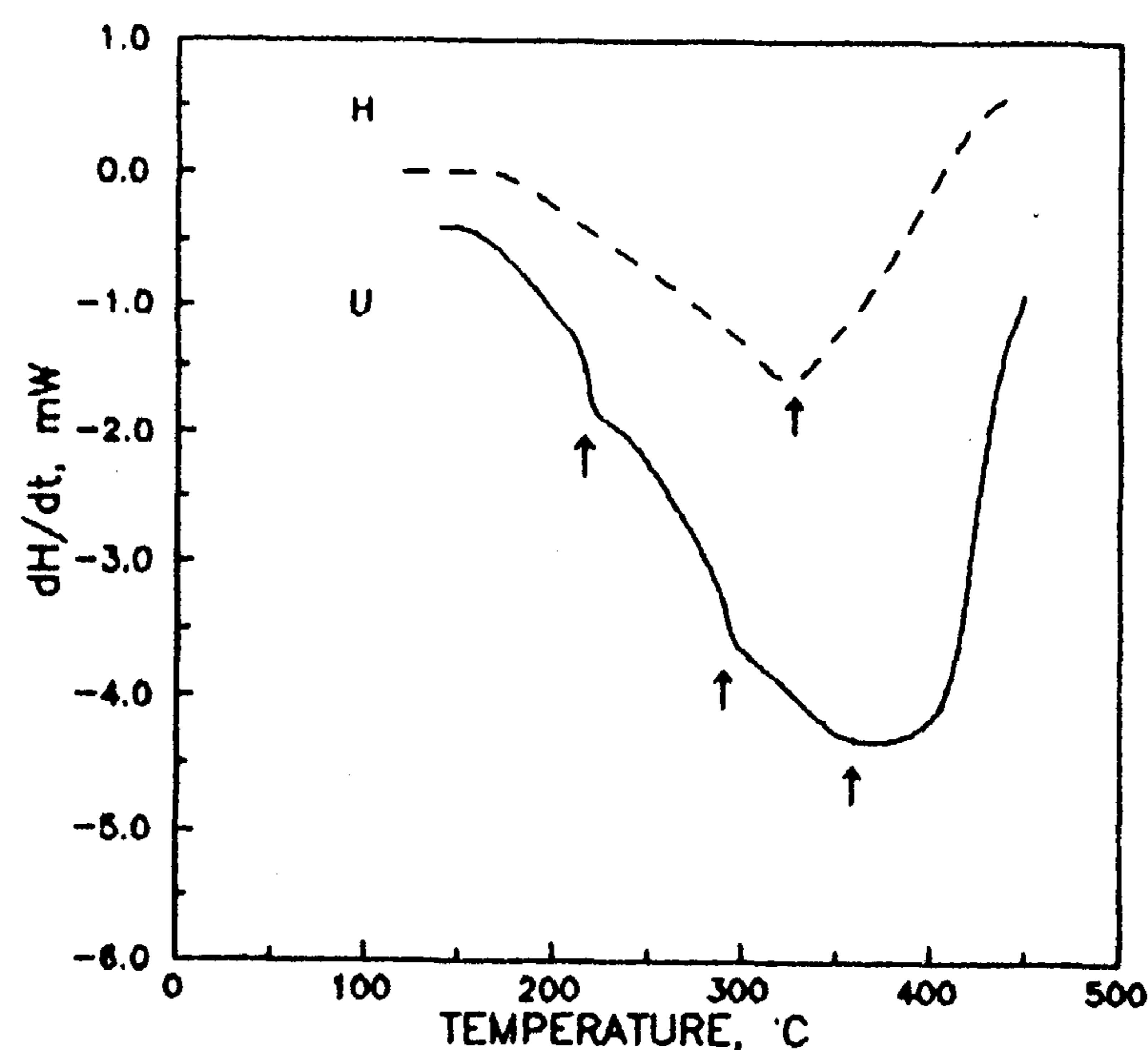


شکل ۵ - ب: تصویر متالوگرافی نوری نمونه همگن شده.

حرارت دیدن آن، واکنش گرمازا یا گرماگیری انجام نمی‌گیرد. در طی آزمایش دمای نمونه ها با سرعت ثابت افزایش یافته و اختلاف جریان حرارت بین نمونه اصلی و نمونه شاهد در فواصل زمانی مختلف توسط سیستمهای اندازه گیری ثبت گردیده و نهایتاً منحنی dH/dt برحسب دما ترسیم می‌گردد. بدین ترتیب باتوجه به خنثی بودن نمونه شاهد، هرگونه تغییر (پیک) در منحنی dH/dt را می‌توان به یک واکنش یا استحالته گرمازا یا گرماگیر در نمونه مورد آزمایش نسبت داد [۱۴]. نتایج حاصل از بررسی DSC نمونه ها در شکل (۶) نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود تغییرات dH/dt در نمونه همگن نشده دو پیک گرمای زای ضعیف و یک پیک گرمازایی شدید و عریض را نشان می‌دهد. در نمونه همگن شده دو پیک ضعیف حذف شده اند و شدت تنها پیک عریض باقیمانده نسبت به نمونه همگن نشده به مراتب ضعیف تر می‌باشد.

پیکهای مشاهده شده فوق به صورتهای متفاوتی ارزیابی و تفسیر شده‌اند [۱۱، ۵-۱۵]. اختلاف موجود در ارزیابی پیکها را به این صورت می‌توان بیان نمود که آیا پیک اول در نمونه همگن نشده مربوط به فرآیند بازبازی می‌باشد و یا اینکه رسوب گذاری در آن دما را مشخص

فرآیند رسوب گذاری و برهم کنش آن با تبلور مجدد در سالهای اخیر با دقت زیادی با استفاده از روش گرماسنجی دینامیک DSC مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲، ۱۱، ۵]. در این روش نمونه مورد آزمایش و نمونه شاهد در داخل محفظه‌های دستگاه قرار می‌گیرند.

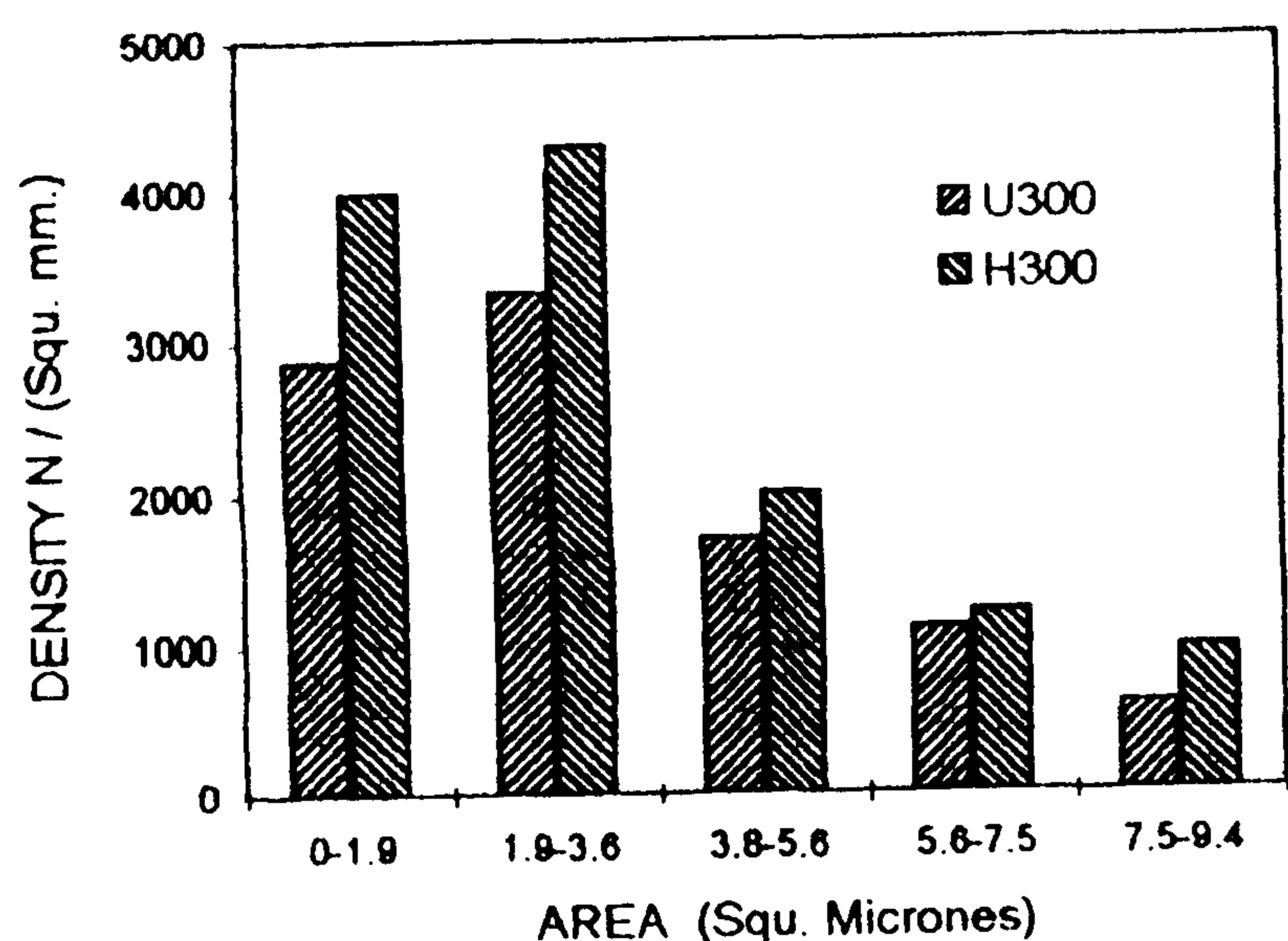


شکل ۶: منحنی های DSC مربوط به نمونه های نورد شده.

ظرفیت حرارتی نمونه شاهد مشابه نمونه اصلی بوده و از نظر حرارتی خنثی می‌باشد. بدین معنی که در طول

شکل (۴)، ۵۰٪ افت استحکام تسلیم در دماهای پایین‌تری از دمای پیک ایجاد شده است. در نتیجه تک پیک مشاهده شده نمی‌تواند بنحو مطلوبی به فرآیند بازیابی و یا تبلور مجدد نسبت داده شود. در هر حال پیک مذکور را می‌توان به یک فرآیند رسوب‌گذاری ضعیف در نمونه همگن شده نسبت داد.

نتایج فوق نشان می‌دهد که اختلاف رفتار تبلور مجدد نمونه‌های همگن شده و همگن نشده را با توجه بر هم‌کنش رسوب‌گذاری و تبلور مجدد به نحو مطلوب‌تری می‌توان توضیح داد. بدین ترتیب فعال شدن رسوب‌گذاری در طی آنیل نمونه‌های همگن نشده موجب کند شدن و به تعویق افتادن فرآیند تبلور مجدد ناپیوسته گردیده و در نتیجه تمایل به آنیل پیوسته را در این نمونه‌ها افزایش داده است. از طرفی دیگر حذف شدن این فرآیند در اثر همگن‌سازی نمونه‌ها، منجر به تبلور مجدد ناپیوسته در نمونه‌های همگن شده می‌گردد که تحت تاثیر حضور ذرات درشت و اثر PSN به نحو شتاب‌دهنده‌ای توسعه می‌یابد.



شکل ۷: توزیع اندازه رسوبات در نمونه‌های آنیل شده.

گزارش شده است که کاهش ضخامت زیاد (۹۸٪) در طی نورد در آلیاژ AA ۸۰۱۱ منجر به انتقال از حالت تبلور مجدد ناپیوسته به حالت تبلور مجدد پیوسته می‌گردد [۶]. این پدیده به تغییرات جهات مرزهای زیردانه‌ها و نحوه توزیع آنها نسبت داده شده و ذکر گردیده که فرآیند

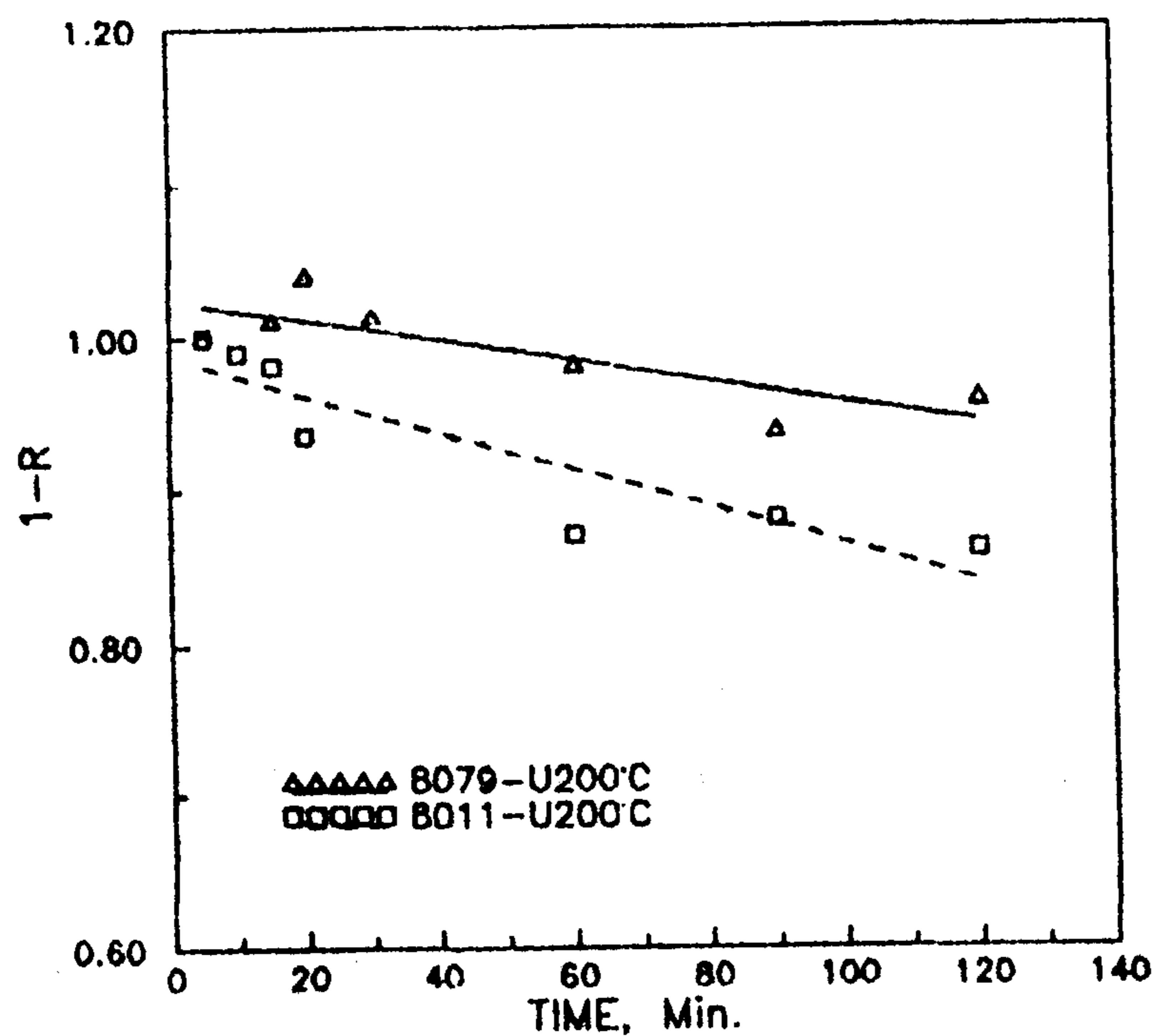
می‌نماید. در هر حال تحقیقات دقیق در این زمینه [۱۵،۵] مشخص ساخته که حذف شدن پیک اول پس از عملیات آنیل میانی نظر دوم را تأیید می‌کند. حال با توجه به مشاهده حذف پیک اول در نمونه همگن شده بطور مشابه می‌توان نتیجه‌گیری نمود که سه پیک متمایز در نمونه همگن نشده به ترتیب رسوب‌گذاری در دمای پایین، تبلور مجدد و رسوب‌گذاری در دمای بالاتر را مشخص می‌نماید. علاوه بر این، اولین پیک مربوط به نمونه همگن نشده در شکل (۶) در حوالی دمای 200°C اتفاق افتاده است. این دما با تغییرات تنش تسلیم و دمای آنیل در شکل (۴) همخوانی دارد، بطوریکه بیشترین اختلاف بین منحنی‌های مربوط به نمونه‌های همگن نشده و همگن شده و در نتیجه بیشترین اثر بازدارنده بر تبلور مجدد (ناشی از رسوب‌گذاری) در محدوده دمایی 150°C تا 250°C رخ داده است. همچنین پیک دوم مربوط به دمای 300°C می‌باشد. در این دما در نمونه همگن نشده ۶۰٪ افت استحکام تسلیم ایجاد گردیده و در نتیجه این پیک را می‌توان بعنوان پیک تبلور مجدد در نمونه همگن نشده شناسایی نمود. از طرف دیگر با توجه به شکل (۴) پس از آنیل 150°C استحکام نمونه‌ها افزایش یافته است. در چنین دمای آنیل پایین، سخت شدن رسوبی می‌تواند بعنوان مکانیزم مقاوم شدن مطرح گردد. با توجه به اینکه این افزایش استحکام پس از همگن‌سازی نمونه‌ها حذف نشده است، نمی‌توان آن را به اولین پیک در DSC در نمونه همگن نشده نسبت داد. چراکه این پیک در نمونه همگن شده حذف شده است. در هر حال این اثر استحکام‌دهی را می‌توان به پیک عریض مربوط به رسوب‌گذاری نسبت داد که در هر دو نمونه همگن شده و همگن نشده مشترک می‌باشد.

تک پیک DSC مشابه با نمونه همگن شده آلیاژ حاضر در آلیاژهای Al-Mn همگن شده نیز مشاهده گردیده [۱۵] ولی توضیح و تفسیر آن به روشنی صورت نگرفته است. چنین به نظر می‌رسد که نوع پیک را باید با توجه به شدت پیک و همچنین تغییرات سایر خواص مثل استحکام و یا هدایت الکتریکی در دمای پیک را مورد ارزیابی قرار داد. پیگ گرم‌سازی مربوط به نمونه همگن شده AA ۸۰۱۱ به مراتب ضعیف‌تر از نمونه همگن نشده می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به تغییرات استحکام تسلیم با دمای آنیل در

از دو حالت همگن شده و همگن نشده محسوس نمی‌باشد [۱۷]. شکل (۸) منحنی های کسر کرنش سختی باقیمانده، $1-R$ ، مربوط به نمونه های همگن نشده را نشان می‌دهد. مقدار R با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$R = (\sigma_m - \sigma_r / \sigma_m - \sigma_o) \quad (2)$$

در رابطه فوق σ_m تنش سیلان نمونه بعد از تغییر شکل، σ_r تنش سیلان بعد از بازیابی و σ_o تنش سیلان در حالت آنیل کامل می‌باشد. چنانکه ملاحظه می‌شود شیب خطوط حاصل و لذا سرعت بازیابی در آلیاژ AA ۸۰۱۱ شدیدتر است. افزایش سرعت بازیابی در آلیاژهای حاوی ذرات، مشاهده گشته و آن را به تاثیر ذرات در قفل شدن نابجاییها نسبت داده اند [۱۰]. بدین ترتیب نتایج ارائه شده توسط شکل (۸) تاثیر رسوب گذاری بر فرآیند آنیل نمونه AA ۸۰۱۱ را تأیید می‌نماید.



شکل ۸: منحنی های کسر کرنش سختی باقیمانده در نمونه های همگن نشده.

نتیجه گیری

نمونه های همگن شده ورقهای AA ۸۰۱۱ در مقایسه با نمونه های همگن نشده استحکام کمتر و انعطاف بیشتری دارند. علاوه بر این همگن سازی در این آلیاژ با

رسوب گذاری، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در این تغییر رفتار تبلور مجدد نداشته است. در تحقیق حاضر، همگن سازی با تاثیر بر نحوه رسوب گذاری در طی آنیل، تمایل به تبلور مجدد ناپیوسته را افزایش می‌دهد. در هر حال این بیان با فرضیات قبلی [۶] مبنی بر تاثیر میزان نورد بر نوع تبلور مجدد مغایرتی ندارد.

چنانکه در شکل (۷) نشان داده شده، تاثیر همگن سازی را می‌توان با کمک نحوه توزیع اندازه ذرات مورد بررسی قرار داد. چنانکه مشاهده می‌گردد پس از همگن سازی، دانسیته ذرات ریزتر افزایش یافته است. همچنین تعداد ذرات درشت تر نیز در اثر فرآیند رشد رسوبات افزایش محسوس را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که میزان فوق اشباع در نمونه های همگن شده کاهش یافته باشد. تحقیقات انجام شده نشان داده است که پس از فرآیند همگن سازی در دمای بالا، مناطق عاری از رسوب، $PFZ^{(1)}$ ، در اطراف ذرات درشت تشکیل می‌گردد [۱۶]. پس از تغییر شکل نمونه های همگن شده، این مناطق به عنوان محلهای مناسبی برای جوانه زنی تبلور مجدد عمل نموده و در طی عملیات آنیل، تبلور مجدد ناپیوسته را تسریع می‌نمایند. در طی آنیل نمونه های همگن نشده علاوه بر رسوب گذاری، حل شدن مجدد رسوبات نیز می‌تواند پس از رسوب گذاری انجام پذیرد. بدین ترتیب رسوب گذاری در این نمونه ها منجر به قفل شدن نابجائیها و مرز زیر دانه ها گردیده و از طرف دیگر حل شدن رسوبات منجر به رشد رسوبات و تشکیل مناطق PFZ و نهایتاً آزاد شدن مرز زیردانه ها و نابجائیها می‌گردد [۱۶]. بنابراین بیشتر بودن میزان فوق اشباع در آلیاژ همگن نشده AA ۸۰۱۱ و در نتیجه رسوب گذاری ناشی از آن در طی آنیل، به همراه رشد رسوبات می‌تواند به ترتیب به قفل کردن مرزها و آزاد شدن تدریجی آنها منجر شده و تبلور مجدد پیوسته را توسعه دهد. سرعت فرآیند بازیابی در آلیاژ حاضر را می‌توان با آلیاژهای مشابه‌ای که در آنها تاثیر رسوب گذاری شدید نمی‌باشد مقایسه نمود. آلیاژ AA ۸۰۷۹ نمونه‌ای مناسب برای این منظور می‌باشد. در طی آنیل آلیاژ AA ۸۰۷۹ همگن نشده، فرآیند رسوب گذاری قابل ملاحظه‌ای رخ نمی‌دهد و تمایل به آنیل پیوسته در هریک

نمونه‌های همگن شده مشخص نموده است. در نتیجه رفتار متفاوت رسوب گذاری در نمونه های همگن شده و همگن نشده نقش اصلی را در متفاوت بودن ویژگیهای تبلور مجدد آنها ایفاء می نماید.

کاهش دمای تبلور مجدد و افزایش میزان تبلور مجدد ناپیوسته همراه می باشد. در این ارتباط نتایج بررسی های DSC، رسوب گذاری همزمان با تبلور مجدد را در نمونه های همگن نشده و تاثیر اندک رسوب گذاری را در

مراجع

- 1 - Blade, J. C. (1987). "Formability in aluminium alloys its assessment and the relevance of microstructure." *Proc., 8th Int. LMC*, Leoben-Vienna, 496-504.
- 2 - Nes, E. (1987). "Influence of recovery, recrystallization and texture on the structure and properties of aluminium alloys." *Proc. 8th Int. LMC*, Leoben-Vienna, 609-614.
- 3 - Rodrigues, P. M. B., and Bate, P. S. (1984). "Texture and earing in aluminium deep drawing." *Proc. Texture in Non-Ferrous Metal and Alloys*, Detroit-Michigan, USA, 173-187.
- 4 - Gomez, H. (1984). "Development of alloy 8011 for substitution of the alloy 3003 in the fabrication of semirigid containers." *Proc. Light Metals Conference*, Las Vegas-Nevada, USA, 341-347.
- 5 - Garcia-Cordovilla, C., Louis, E. (1986). "A differential scanning calorimetry study of recrystallization and its interaction with precipitation in Al-Fe-Si commercial alloys." *Journal of Materials Science*, 21(3), 971-979.
- 6 - Oscarssen, A., Lehtinen, B., Hutchinson, B., Ekstrom, H. E., Bate, P., Haggstrom, L. and Ghandour, A. M. (1994). "Microstructural changes during the annealing of AA 8011 foil rolled from cast strip." *Proc. 4th Int. Conf. on Aluminium Alloys*, Atlanta-Georgia, USA, 144-152.
- 7 - Mould, P. R., and Cotterill, P. (1976). *Recrystallization and Grain Growth in Metals*. Surrey University.
- 8 - Mould, P. R., and Cotterill, P. (1967). "The effect of particle content and matrix grain size on the recrystallization of two phase aluminium alloys." *Journal of Materials Science*, 2, 241-255.
- 9 - Furrer, P., Rheinfol, N. A., and Warlimont, H. (1987). "The effect of segregation and precipitation on the annealing behaviour and grain size of aluminium alloys." *Aluminium*, 54, 135-142.
- 10 - Humphreys, F. J., and Hatherly, M. (1995). *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Elsevier Science Ltd.
- 11 - Garcia-Cordovilla, C., and Louis, E. (1984). "A differential scanning calorimetry study of recovery and recrystallization in commercial Al-Fe-Si alloy." *Scripta Metallurgica*, 18(9), 549-553.
- 12 - Straink, M. J., Hobson, A. J. and Gregson, P. J. (1996). "Dsc sample preparation for Al-based alloys." *Scripta Materiala*, 34(11), 1711-1716.
- 13 - Nebti, S., Hamana, and Cizeron, G. (1995). "Calorimetric study of pre-precipitation and precipitation in Al-Mg alloy." *Acta Metallurgica*, 43(9), 3583-3588.
- 14 - Tunistra, P., Duine, P., Sietsma, J., and Beukel, V. (1995). "The calorimetric glass transition of amorphous Pd Ni P." *Acta Metallurgica*, 43(7), 2815-2823.
- 15 - Garcia-Cordovilla, C. and Louis, E. (1987). "Precipitation and recrystallization processes in Al-Mn alloys studied by means of differential scanning calorimetry." *Proc. 8th Int. LMC*, Leoben-Vienna, 452-455.

- 16 - Morris, P. L., and Duggan, B. J. (1987). "Precipitation and recrystallization in an Al-1.8% Mn alloy." *Metal Science*, 17(1), 1-7.
- 17 - Aghaie Khafri, M. (1996). "Forming behaviour of AA8011 and AA8079 aluminium sheets." *M. Sc. Thesis*, Tehran University.

واژه نامه

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 - Differential Scanning Calorimetry | روش گرماسنجی دینامیک |
| 2 - Particle-Hardened | سخت شونده توسط ذرات |
| 3 - Particle Stimulated Nuclation | تحریک شده توسط ذرات (PSN) |
| 4 - Extended Recovery | بازیابی گسترش یافته |
| 5 - Precipitation Free Zone | مناطق عاری از رسوب |