

رسوب سختی آلیاژهای آلومینیوم:

تاریخچه :

فرآیند رسوب سختی (پیرسختی) در سال ۱۹۰۶ بوسیله Dr.A.Wilm آلمانی کشف گردید. دکتر Wilm یک آلیاژ ۴ درصد مس و ۰/۵ درصد منیزیم را حرارت داده و پس از آن به سرعت سرد نمود و سپس سختی آلیاژ را اندازه گرفت. او متوجه شد که با گذشت زمان به مدت چند روز در درجه حرارت محیط سختی نمونه ها به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش یافت.

دکتر Wilm در سال ۱۹۱۱ نتایج خود را منتشر نمود ولی نتوانست توضیحی برای این سخت شدن بدهد. زیرا از نظر میکروسکوپی هیچ گونه تفاوتی بین نمونه های سخت و نمونه های نرم مشاهده نکرده بود. از زمان Wilm تا کنون دانشمندان و مهندسين متعددی فرآیند رسوب سختی را مطالعه و مطالب مختلف و متعددی در مورد آن یافته اند ولی هنوز هم مکانیزم دقیق آن مورد مطالعه قرار می گیرد.

اصول رسوب سختی:

برای سخت کردن یک آلیاژ آلومینیوم از طریق فرآیند رسوب سختی ابتدا به فلز یک عمل حرارتی حل کردن داده می شود عمل حرارتی آلیاژ را به درجه حرارتی که بقدر کافی زیاد است تا عناصر آلیاژی را داخل محلول جامد بنماید حرارت می دهند.

درجه حرارت مورد استفاده بستگی به ترکیب شیمیائی آلیاژ دارد. پس از حرارت دادن به درجه حرارت انحلال و نگه داشتن در آن درجه حرارت به مدت لازم آلیاژ به درجه حرارت پائین تری سریعاً سرد می شود تا این عناصر را در محلول جامد فوق اشباع شده نگه دارد.

قسمت دوم فرآیند رسوب سختی، پیر کردن است که در خلال رسوبات تشکیل می گردند. اگر رسوب گیری که باعث سختی آلیاژ می شود خود به خود در درجه حرارت محیط انجام گیرد گفته می شود که آلیاژ بصورت طبیعی پیر شده (Natural Ageing) است.

در هر حال اگر لازم باشد آلیاژ را حرارت داد (معمولاً در ۲۶۰-۹۳ درجه سانتی گراد به مدت چندین ساعت) تا رسوب گیری انجام گیرد در آن صورت آن را پیر سختی مصنوعی (Artificial Ageing) می نامند.

آلیاژهای آلومینیوم که قابل سخت شدن از طریق رسوب سختی هستند را بنا به تعریف آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر می نامند.

شرایط مورد نیاز:

برای این که آلیاژ آلومینیوم قابل رسوب سختی باشد باید برخی شرایط خاص را دارا باشد. اول این که آلیاژ باید حاوی مقادیر قابل توجهی از حداقل یک عنصر یا یک ترکیب که با کاهش درجه حرارت از حد حلالیت حالت جامد آن کاسته می شود باشد یعنی این عناصر یا ترکیبات باید دارای حلالیت حالت جامد قابل توجهی در درجات حرارت بالا و حلالیت حالت جامد ناچیز در درجات حرارت پائین باشند.

شرط دوم این است که عنصر یا ترکیبی که در محلول جامد فوق اشباع نگه داشته می شود باید رسوب کرده و تولید تغییر فرم ها و اعوجاج شبکه ای در آلومینیوم بنماید. معمولاً رسوب این عناصر یا ترکیبات بتدریج باعث سخت تر شدن آلیاژ شده تا این که سختی آن به یک مقدار حداکثر برسد. ادامه عملیات رسوب گیری پس از این نقطه باعث کاهش سختی می گردد. آلیاژهائی که به مقدار کافی پیر نشده و به سختی حداکثر نرسیده باشند را کم پیری (underaged) و آلیاژهائی که از سختی حداکثر رد شده باشند یا بمدت طولانی تر پیر شده باشند را پرپیری (overaged) می نامند .

فرایند رسوب سختی آلیاژهای آلومینیوم را می توان بصورت زیر خلاصه نمود:

- ۱- گرم کردن به درجه حرارت عملیات حرارتی انحلال (حل کردن)
- ۲- حرارت دادن در آن درجه حرارت برای مدت زمان کافی
- ۳- سریع سرد کردن به درجه حرارت نسبتاً پایین
- ۴- پیر کردن برای رسوب سختی از طریق:
 - ❖ الف- پیرکردن طبیعی در درجه حرارت محیط یا،
 - ❖ ب- پیر کردن مصنوعی بوسیله حرارت دادن در یک درجه حرارت پائین ۲۶۰-۹۳ درجه سانتی گراد بمدت لازم.

به عنوان مثال عملیات حرارتی یک آلیاژ ۴٪ AL-CU را در نظر بگیرید. ابتدا آلیاژ به ۵۰۴ درجه سانتی گراد حرارت داده می شود تا تمام مس وارد محلول جامد گردد. سپس آلیاژ در آب سرد سریعاً سرد می گردد تا به درجه حرارت محیط برسد. اگر آلیاژ به ۱۷۱ درجه سانتی گراد بمدت ده ساعت حرارت داده شود از طریق پیر کردن مصنوعی سخت می گردد. باید توجه داشت که اگر این آلیاژ حاوی ۰/۵ درصد منیزیم باشد می تواند در درجه حرارت محیط بصورت طبیعی پیر سخت شود.

۱- عمل حرارتی انحلال (Solution Heat Treatment):

درجه حرارت عملیات حرارتی انحلال طوری انتخاب می گردد که بالاتر از منحنی حلالیت جامد باشد ولی خطر ذوب اجزاء یوتکتیکی نقطه ذوب پائین وجود نداشته باشد. معمولاً کنترل درجه حرارت گروه در حدود دقت $\pm 5/5$ درجه سانتی گراد نگه داشته می شود. آلیاژهائی که حتی چند درجه بیشتر از حد معین حرارت داده شوند بطور جزئی ذوب شده و در آن صورت فلز مربوطه را باید به علت از دست دادن خواص مکانیکی بصورت قراضه و ضایعات در آورد.

زمان لازم برای عملیات حرارتی انحلال بستگی به آلیاژ و نوع محصول دارد. بطور کلی قطعات کار شده احتیاج به زمان کمتری نسبت به قطعات ریختگی داشته و قطعات کار سرد شده زمان کمتری نسبت به قطعات کار گرم شده دارد. قطعات در ماسه به علت درشت بودن اجزاء ساختمانی آنها زمان بیشتری نسبت به قطعات ریختگی در قالب دائمی دارد. در مورد اغلب محصولات صفحه ای ورق، نیم ساعت تا دو ساعت

زمان کافی برای عملیات حرارتی انحلال است، از طرف دیگر برخی از قطعات ریختگی ممکن است تا ۱۲ ساعت حرارت دادن نیاز داشته باشند. اگر ماده کار سرد شده باشد باید آن را تقریباً به سرعت به درجه حرارت انحلال لازم رسانید تا از رشد دانه ها جلوگیری گردد.

باید به تفاوت بین عملیات حرارتی انحلال و عملیات تابکاری توجه شود. در هر دو مورد فرآیندهای بازپایی، تبلور مجدد و رشد دانه بطور مشابه انجام می گیرد. در هر حال عملیات حرارتی انحلال نسبت به عملیات تابکاری در درجه حرارت بالاتری انجام می شود تا به اجزاء ساختمانی لازم چون اجازه انحلال و ورودی به محلول جامد داده شود، که پس از آن رسوب می کند. در تابکاری قطعات، این اجزاء ساختمانی به مقدار زیادی وارد محلول جامد نمی گردد ولی اجازه رشد و درشت تر شدن ذرات داده می شود. قطعات عملیات حرارتی انحلال شده نسبت به قطعات تابکاری شده، به علت استحکام بخشی از طریق محلول جامد حاصل، معمولاً سخت تر هستند.

۲- سریع سرد کردن (Quenching):

پس از این که اجزاء ساختمانی وارد محلول جامد گردیدند آلیاژ آلومینیوم به سرعت به درجه حرارت پائینی سرد می شود تا این اجزاء در محلول باقی بمانند. معمولی ترین محیط های سرد کردن آلیاژهای آلومینیوم آب داغ و آب سرد است .

سریع سرد کردن در آب سرد برای مواد نازکی چون ورق، قطعات فشار کاری شده، لوله و قطعات پتکاری شده کوچک بکار می رود. درجه حرارت آب زیر ۲۹ درجه سانتی گراد نگه داشته می شود و اجازه افزایش بیش از ۱۱ درجه سانتی گراد به آن داده نمی شود. این سرد شدن ناگهانی حداکثر مقاومت در مقابل خوردگی را به آلیاژ می دهد ولی ممکن است باعث اعوجاج قطعه گردد. عموماً پس از سریع سرد کردن در آب سرد نمونه را صاف می کنند تا هر گونه چین و چروک و عیوب دیگر از این نوع را حذف نمایند . سریع سرد کردن در آب داغ بر روی قطعات سنگین آلومینیومی چون قطعات بزرگ پتکاری شده و ریختگی که در مورد آنها مقاومت خوردگی زیاد مهم نیست بکار می رود. سریع سرد کردن در آب داغ عموماً در ۶۶ درجه سانتی گراد تا ۸۲ درجه سانتی گراد و یا در ۱۰۰ درجه سانتی گراد (آب جوش) انجام می گیرد. چون سرد کردن در آب داغ آهسته تر از سرد کردن در آب سرد است بنابراین اعوجاج قطعه در این مورد خیلی زیاد نبوده و به مقدار حاصل در آب سرد نیست.

۳- پیرسازی (Ageing):

آلیاژهای آلومینیوم پس از عملیات حرارتی انحلال و سریع سرد کردن پیر می شوند تا رسوب دهند. سریع سرد کردن از درجات حرارت بالا قسمت اعظم عناصر محلول را در درجات حرارت پائین در داخل محلول جامد فوق اشباع نگه می دارد. در هر حال آلیاژهای آلومینیوم قابل سخت شدن از طریق رسوب گیری در حالت سریع سرد شده ناپایدار هستند. در اثر پیر شدن، ذرات بسیار ریز میکروسکوپی تشکیل می گردند که

به عنوان مانع در دانه ها و مرزدانه ها عمل می نمایند. این ذرات بسیار ریز پخش شده در آلیاژ بقدری به آن استحکام می بخشند که آلیاژ می تواند بار بیشتری را تحمل کرده و تغییر فرم بیشتری را بدست آورد. اندازه و چگونگی توزیع رسوب بسیار مهم است زیرا ذرات بسیار درشت باعث ایجاد خواص مکانیکی ضعیف تر از خواص مکانیکی مطلوب می گردند. آلیاژهای آلومینیوم قابل پیر شدن طبیعی استحکام کامل خود را پس از ۴ تا ۵ روز در درجه حرارت محیط بدست می آورند. در حدود ۹۰ درصد حداکثر استحکام قابل حصول در این آلیاژها پس از ۲۴ ساعت حاصل می گردد. شکل دادن آلیاژهای قابل پیر سختی طبیعی عموماً در حالت نرم قبل از پیر سختی انجام می گیرد. با قرار دادن قطعات درست پس از سریع سرد شدن و قبل از پیر سختی طبیعی یافتن دریخ خشک ۷۳ تا ۴۶ درجه سانتی گراد می توان از رسوب گیری جلوگیری نمود تا قطعه در زمان لازم مورد استفاده قرار گیرد. پیر سختی مصنوعی آلیاژهای آلومینیوم عموماً در درجات حرارت ۲۶۰-۹۳ درجه سانتی گراد انجام می گیرد وقت درجه حرارت در حد ± 3 درجه سانتی گراد نگهداشته می شود. زمان لازم برای عمل بستگی به آلیاژ و درجه حرارت پیرسختی دارد وقتی که یک آلیاژ جدید ساخته شد در درجات حرارت و برای مدت زمان های مختلف منحنی های پیر سختی تجربی رسم می گردد تا مشخصات پیر سختی مناسب بدست آید.

رسوب سختی آلیاژهای کار پذیر آلومینیوم:

رسوب سختی در برخی از انواع مهم سیستم های آلیاژی آلومینیوم در اینجا مورد بررسی قرار می گیرد. برای درک بهتر باید به نمودارهای تعادلی که در فصول قبلی آورده شده است نیز مراجعه شود.

۱- آلیاژهای Al-Cu:

همان گونه که ذکر گردید فرآیند رسوب سختی برای اولین بار بوسیله wilm در آلیاژ آلومینیوم حاوی ۴/۵ درصد مس و ۰/۵ درصد منیزیم مشاهده گردید. به این دلیل سیستم Al-Cu-Mg سیستمی است که مورد بررسی و تحقیق زیاد قرار گرفته است.

مکانیزم رسوب دادن ذرات:

۱- عملیات حل سازی در منطقه محلول جامد آلفا انجام شود (حدود ۵۱۵ درجه سانتی گراد):

ابتدا آلیاژ آلومینیوم با ۴٪ مس باید تا حدود ۵۱۵ درجه سانتی گراد گرم شود تا اینکه اتم های مس و آلومینیوم به طور تصادفی به داخل محلول جامد همگن آلفا نفوذ کند. آلیاژ در این مرحله از محلول جامد آلفا تشکیل شده است.

۲- تا دمای اتاق یا کمتر به سرعت آبدهی شوند:

این عملیات یک محلول جامد فوق اشباع مس در آلومینیوم ایجاد میکند. آلیاژ آلومینیوم با ۴٪ مس در این شرایط پایدار نیست و سعی میکند با ساختن فازهای نیمه پایدار انرژی سیستم را کاهش دهد. نیروی محرکه فازهای نیمه پایدار، انرژی زیاد محلول جامد فوق اشباعنا پایدار مس در آلومینیوم است.

۳- در گستره دمایی ۱۳۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی گراد به طور مصنوعی پیر شوند:

اگر چه برخی از آلیاژها در دمای اتاق تا استحکام مورد نظر پیر سخت می شوند، ولی اغلب آلیاژها باید در دمای بیشتر پیر شوند. در مورد آلیاژ آلومینیوم با ۴٪ مس دمای پیر سختی مصنوعی بین ۱۳۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی گراد است.

ساختارهایی که به هنگام پیر شدن آلیاژهای آلومینیوم مس تشکیل می شوند عبارتند از:

الف: محلول جامد فوق اشباع .

ب: مناطق GP۱ .

پ: مناطق GP۲ (یا فاز ۰") .

ت: فاز ۰' .

ث: فاز ۰ .

ب: مناطق GP۱ :

این مناطق در دماهای پایین تشکیل می شوند یعنی کمتر از ۱۳۰ درجه سانتی گراد ، و با جدایش اتمهای مس در محلول جامد فوق اشباع آلیاژهای آلومینیوم مس بوجود می آیند. مناطق GP۱ شامل دیسکهایی به ضخامت ۴ تا ۶ آنگستروم و قطر ۸۰ تا ۱۰۰ آنگستروم است که بر سطوح مکعبی {۱۰۰} زمینه ساخته می شوند. طبق نظریه دالگرن مناطق GP۱ درصد کمی مس دارد. مناطق GP۱ با میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده میباشد. این مناطق از حرکت نابجاییها جلوگیری میکنند و باعث کاهش شکل پذیری و افزایش استحکام می شوند. این مناطق بدلیل آنکه قطر اتمی مس حدود ۱۱ درصد کمتر از آلومینیوم بوده پارامتر شبکه مکعبی منطقه کمتر از شبکه زمینه است و در نتیجه به صورت تترائگونال کشیده می شود.

پ: مناطق GP۲ (یا فاز ۰") :

مثل مناطق GP۱ ، مناطق GP۲ نیز ساختاری تترائگونال دارند و با صفحات {۱۰۰} زمینه آلومینیوم با ۴٪ مس یا آلیاژهای مشابه همدوس هستند. در مراحل اولیه تشکیل مناطق GP۲ به نظر می رسد که مقدار مس کم است ولی با افزایش زمان پیر شدن هم مقدار مس و هم اندازه رسوبها افزایش می یابد. قتی که پیر شدن در دمای ۱۳۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی گراد انجام شود مناطق GP۲ سختی آلیاژ آلومینیوم با ۴٪ مس را بیشتر افزایش می دهد .

ت: فاز ۰' :

فرا پیری آلیاژ آلومینیوم با ۴٪ مس زمانی رخ می دهد که فاز کاملاً نامربوط ، نا همدوس و نیمه پایدار ۰' به وجود آید. این فاز به صورت ناهمگن مخصوصاً روی نابه جاییها جوانه می زند. اندازه فاز ۰' به مدت زمان و دمای پیری بستگی دارد . وقتی این فاز به تنهایی ظاهر شود آلیاژ در فرا پیری است.

ث : فاز ۰ :

پیر کردن در دمای ۱۹۰ درجه سانتی گراد یا بیشتر برای مدت خیلی طولانی فاز تعادلی نا همدوس 'θ، Cu Al₂ را ایجاد می کند. این فاز دارای ساختار BCT بوده و وقتی که آلیاژ در شرایط فرا پیری شدید باشد بوجود می آید. فاز θ با از بین رفتن فاز 'θ بوجود می آید.

۲- آلیاژهای Al-Mg-Si :

همان گونه که قبلاً گفته شد جزء اصلی سخت کننده در این آلیاژها است که به مقدار یک تا دو درصد موجود است. حد حلالیت جامد در درجه حرارت یوتکتیک در حدود ۱/۸۵ درصد بوده به تدریج با کاهش درجه حرارت به تا درجه حرارت محیط به حدود ۰/۱ درصد کاهش می یابد. مکانیزم رسوب گیری هنوز مورد شک و تردید می باشد ولی اعتقاد بر این است که رسوبات بصورت رشته های کوچکی رسوب می کنند که بعداً بصورت ورقه های کوچک رشد می نمایند .

این آلیاژها عموماً در ۵۲۱ درجه سانتی گراد عملیات حرارتی انحلال می شوند، ولی در واقع استحکام آنها با افزایش درجه حرارت عملیات حرارتی انحلال به تا ۵۲۲ درجه سانتی گراد افزایش می یابد. برای پرهیز از بیش از حد داغ شدن و ذوب در عملیات تجارتي از درجات پائین تر از ۵۲۱ درجه سانتی گراد استفاده می شود. برای حصول حداکثر استحکام، آلیاژهای Al-Mg-Si باید از درجه حرارت عملیات حرارتی انحلال سریعاً سرد شوند. این آلیاژها بصورت طبیعی پیر نمی شوند زیرا درجه حرارت محیط خیلی آهسته و بتدریج پیر سخت می گردند.

چون پیر شدن طبیعی برای مدت زمان کوتاه تولید استحکام بقدر کافی و پایداری نمی کند بنابراین برای آلیاژهای تقریباً همواره از پیر کردن مصنوعی استفاده می گردد. پیر کردن در درجات حرارت پائین تر و برای مدت زمان های طولانی تر بالاترین استحکام را ایجاد می نماید. آلیاژ ۶۰۶۱ معمولاً از طریق عملیات حرارتی انحلال، سریع سرد کردن و پیر سختی مصنوعی ساخته می شود.

۳- آلیاژهای Al-Zn-Mg-Cu :

روابط تعادلی در درجات حرارتی مختلف برای سیستم Al-Zn-Mg-Cu قبلاً مورد بررسی قرار گرفته بود. مهمترین فازهای رسوبی که باعث سختی می شوند و می باشند. ذرات در این آلیاژها که حاوی روی بیشتری نسبت به منیزیم هستند موثر تر می باشند. بنظر می رسد که رسوب گیری در آلیاژهای Al-Zn-Mg بصورت زیر انجام می گیرد :

← فاز واسطه ← مناطق G.P. در آلومینیم

با افزایش مس به آلیاژهای Al-Zn-Mg فازهای تشکیل می شود ولی به نظر می رسد که در اینجا نیز فاز اصلی سخت کننده رسوبات باشند.

چون این آلیاژها دارای یوتکتیکهای نقطه ذوب پایینی هستند باین جهت آنها را در ۴۴۳-۴۷۷ درجه سانتی گراد عملیات حرارتی انحلال می نمایند. چگونگی پیر سختی آلیاژ ۷۰۷۵ در درجه حرارت محیط و ۱۸-درجه سانتی گراد در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مانند آلیاژهای Al-Cu می توان با نگهداشتن این آلیاژها در درجات حرارت پایین، پیر سخت شدن طبیعی آنها را به تأخیر انداخت. آلیاژ ۷۰۷۹ دارای مشخصات پیر سختی طبیعی مشابه ۷۰۷۵ بوده ولی استحکام کمتری در این آلیاژ تولید می شود

پیر سخت شدن طبیعی آلیاژهای Al-Zn-Mg-Cu گرچه باعث افزایش استحکام می گردد ولی تولید فلز ناپایداری کرده و بنا براین این آلیاژها فقط به حالت پیر سخت شدن مصنوعی مورد استفاده قرار می گیرند. منحنی های پیر سختی مصنوعی آلیاژ ۷۰۷۵ که در آن پیر سختی از ۱۷ روز پس از سریع سرد شدن آلیاژ از درجه حرارت عملیات حرارتی انحلال شروع شده است

h-Daneshmand