

## مقدمه:

با توجه به اینکه اساس موضوع پروژه بر پایه عملیات حرارتی رسوب سختی ۱ می باشد لازم است برای درک آسان مطالب توسط مخاطب، مقدماتی راجع به این عملیات بیان شود. توضیح بیشتر در مورد این عملیات حرارتی در ادامه مباحث آورده خواهد شد.

برای افزایش استحکام و سختی یک آلیاژ، تنها دو روش اصلی وجود دارد: کارسرد یا عملیات حرارتی. مهمترین فرآیند عملیات حرارتی برای آلیاژهای غیر آهنی پیر سختی یا رسوب سختی است. برای استفاده از این روش، باید دیاگرام تعادلی دارای حلالیت جزئی در حالت جامد باشد و شیب خط انحلال بصورتی باشد که قابلیت انحلال در درجه حرارتهای بالاتر بیشتر از قابلیت انحلال در درجه حرارتهای پایینتر باشد. پیر سختی یکی از روش های استحکام بخشی به مواد فلزی با اضافه کردن ذره های سخت و کاملاً پراکنده به آن است. با انتخاب مناسب عناصر آلیاژی اضافه شونده و عملیات گرمایی، می توان توزیع مناسبی از رسوب حالت جامد فاز دوم را در زمینه ای که آن رسوبات را در خود حل کرده است پدید آورد. اگر با این عمل فلز استحکام یافت آن را رسوب سختی می نامند که روشی قابل استفاده در سطحی وسیع برای استحکام بخشی مواد فلزی است.

### بطور کلی در عملیات حرارتی پیر سختی (رسوب سختی) سه مرحله وجود دارد:

۱) عملیات حرارتی انحلالی (محلول سازی) در دمای نسبتاً بالا در ناحیه تک فازی به منظور حل شدن عناصر آلیاژی.

۲) کوئنچ (آبدهی) تا دمای محیط برای بدست آوردن محلول جامد فوق اشباع از این عناصر در آلومینیوم.

۳) پیرسازی (تجزیه کنترل شده محلول جامد فوق اشباع برای تشکیل رسوبات ریز و پراکنده در زمینه فلز).

آلیاژ پس از اینکه در یک مدت مشخص تا یک دمای مشخص در منطقه تکفازی حرارت داده شد، در آب سریع سرد می شود. حال آلیاژ کوئنچ شده، یک محلول جامد فوق اشباع است و بنابراین در یک حالت ناپایدار قرار دارد، بطوری که اتم محلول اضافی، تمایل دارد که از محلول خارج شود. منظور از انجام عملیات حرارتی محلول سازی، حصول انحلال کامل عناصر آلیاژی است. در مرحله سوم از عملیات حرارتی پیر سختی، به تجزیه کنترل شده محلول جامد فوق اشباع عناصر آلیاژی اصلی در آلومینیوم برای تشکیل رسوبات ریز و پراکنده در زمینه آلومینیوم پرداخته می شود. به عبارتی مرحله پیر سازی، اجازه دادن به فاز استحکام دهنده جهت رسوب از محلول جامد فوق اشباع می باشد اگر این عملیات در دمای محیط و در حالت خود به خودی و به عبارتی بدون عملیات گرمایی انجام شود به آن عملیات پیرسازی طبیعی گفته

می شود اما اگر این عملیات با حرارت دادن قطعه در دماهای پایین انجام شود به آن عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی نسبت داده می شود .

در واژگان تخصصی عملیات حرارتی ،  $T_6$  و  $T_4$  به ترتیب به آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر پیر سخت شده مصنوعی و طبیعی آلومینیوم اطلاق می شود .

### آلومینیوم:

آلومینیوم به عنوان یک فلز استراتژیک در پیشرفت و توسعه کشورهای مختلف جهان نقش موثری را ایفا نموده است. آلومینیوم سومین عنصر از لحاظ فراوانی (۸٪) در پوسته زمین بعد از اکسیژن (۴۷٪) و سیلیس (۲۸٪) می باشد. این عنصر در طبیعت بصورت خالص یافت نشده و اغلب بصورت ترکیبات سیلیکاته و مخلوط با سایر اکسیدها می باشد که اولین بار در سال ۱۸۰۸ توسط Sir Humphry Davy بصورت خالص بدست آمد و لذا فلز جوانی محسوب می گردد. آلومینیوم و آلیاژهای آن دارای قدرت نسبتاً کوتاهی به عنوان یک ماده صنعتی می باشند. با این حال به علت انواع خواص مورد نیاز صنعت مدرن که در آلومینیوم یافت می شود مصرف و تولید آن هر سال در حال افزایش است و آینده وسیع و پیشرفته ای برای آن پیش بینی می گردد. تا قبل از جنگ جهانی دوم آلومینیوم بیشتر به عنوان وسائل و ظروف آشپزخانه معرفی شده و مصرف آن در کابل های انتقال الکتریسته با ولتاژ زیاد نیز توسعه یافته بود، ولی در خلال جنگ نیاز به طرح های جدید هواپیما و آلیاژهای پر استحکام، توسعه و مصارف جدید آلومینیوم را سرعت بخشید. پس از جنگ نیز مصارف شهری- صنعتی آلومینیوم گسترده گشت و امروزه این فلز به عنوان یک ماده اولیه مهم صنعتی محسوب شده و در بازار جهان مانند فولاد و در واقع پس از فولاد مهمترین ماده مصرفی می باشد .

روش های تولید آلومینیوم:

#### ۱) روش الکترولیز کلرید آلومینیوم:

ابتدا وهلر آلومینیوم خالص را به وسیله الکترولیز کلرید آلومینیوم در مجاورت پتانسیل تولید نمود (سال ۱۸۲۹ م). دوپل سدیم را جانشین پتاسیم نمود که نتیجه آن ساخت اولین کارخانه تولید آلومینیوم با ظرفیت بسیار پایین بود. این دو روش بسیار پر هزینه بودند و همین امر باعث شده بود که آلومینیوم همانند طلا و نقره ارزش پیدا کند .

#### ۲) روش الکتروترمیک:

در این روش اکسید آلومینیوم توسط کربن در دمای بالاتری از نقطه ذوب  $3 \text{ Al}_2\text{O}_3$  احیا می شود. آلومینیومی که بدین روش تولید می شود، حاوی مقداری کربن می باشد. این عملیات معمولاً در کوره قوسی صورت می گیرد .



### ۳) روش هال-هرولت:

در سال ۱۸۸۶ میلادی پال هرولت و چارلز هال بطور مستقل فرآیندی را که طی آن آلومینا در کریولیت مذاب حل و به طور الکترو شیمیایی تجزیه شده و در نتیجه آلومینیوم مذاب تولید می گردد را ارائه نمود. تا کنون هیچ راه مناسبتری نتوانسته جایگزین این فرآیند گردد و امروزه این روش تنها روش تولید آلومینیوم می باشد .

جدا از این سه روش ذکر شده قدم اول در تولید آلومینیوم ، ذوب مجدد است. ابتدا کوره ها را با آلومینیوم مذابی که مستقیماً از سلول های احیا می آید و یا با شمش که باید ذوب شود پر می کنند. عناصر آلیاژی اصلی شمش و قراضه افزوده می شود. فلز مذاب در کوره ذوب مجدد با برداشت سرباره تمیز میشود. همچنین مذاب به منظور حذف هیدروژن گازی حل شده، با گاز کلر گاز زدایی می شود. پس از گاز زدایی و تمیز کردن فلز، با گذاشتن توری سیمی ریخته گری انجام می شود. انواع شمش ها مثل شمش ورق و شمشال آهنگری معمولاً از طریق ریخته گری مستقیم در قالب فلزی ریخته می شود و در این فرآیند، فلز مذاب را در قالبی که با آب سرد می شود می ریزند .بلافاصله بعد از اینکه انجماد فلز شروع شد انتهای قالب را پایین می آورند به طوری که فلز به صورت مداوم در شمش هایی با حدود ۱۴ فوت طول ریخته شود .

#### تولید آلیاژ کارپذیر آلومینیوم از طریق ریخته گری در فرآیند تبرید مستقیم (DC) :

معمولاً شمش ها را از طریق فرآیند عمودی، که در آن آلیاژ مذاب بداخل یک تا چند قالب ثابت آب سرد شونده که دارای مقاطع چهار گوش هستند ریخته می شوند، تولید می کنند فرآیند انجماد در دو مرحله انجام می شود. تشکیل فلز جامد در دیواره سرد شده قالب و انجماد باقی مانده مقطع بیلت از طریق جذب حرارت توسط سرد کننده های پاششی. مقطع شمش تولیدی مورد نیاز برای نورد یا آهنگری بعدی ممکن است بصورت چهار گوش و برای اکترورژن بشکل گرد باشد و در هر دو مورد ممکن است وزن آن ها به چند تن برسد .

#### همگن کردن شمش ها :

قبل از تبدیل شمش های DC به محصولات و شکل های واسطه ای، لازم است این شمش ها را در دماهای بالا همگن کرد تا جدایش را کاهش داد و مقدار یوتکتیک های غیر تعادلی نقطه ذوب پایین را که ممکن است باعث ترک خوردن شمش در خلال عملیات بعدی شود کم کرد. در این ارتباط مشخص شده است که مدت زمان همگن کردن در هر دمای معین نسبت عکس با مجذور فاصله شاخه های دندردیتی در شمش دارد. عمل همگن کردن مخصوصاً در مورد آلیاژهای پر استحکام اهمیت زیادی دارد . زیرا این فرآیند به عنوان عمل رسوب گذاری و توزیع مجدد ترکیبات بین فلزی بسیار ریز فلزات واسطه ای مانند نیز محسوب می شود. این فلزات واسطه در خلال سریع سرد شدن شمش ریختگی DC ممکن است در آلومینیوم بصورت فوق اشباع در آیند که در آن صورت لازم است بصورت ترکیبات ریزی که یکنواخت توزیع شده اند

در آیند تا ساختار دانه ای را کنترل کنند. به علاوه امروزه مشخص شده است که این ذرات ممکن است از طریق تاثیر بر روی عکس العمل آلیاژ به عملیات پیر کردن و نیز تاثیر بر روی ریز ساختار نابجاییهای تشکیل شده در خلال تغییر شکل تاثیر قابل توجهی بر انواع خواص مکانیکی بگذارد .

تنظیم انواع ذرات فوق الذکر، انتخاب دقیق شرایط برای همگن کردن شمش ها در آلیاژهای مختلف را ایجاب می کند. وقتی که رسوب این ترکیبات نقش بازی می کنند در آن صورت هم زمان و هم دما مهم بوده و نرخ گرمایش تا دمای همگن کردن نیز تاثیر حیاتی دارد. برای انجام جوانه زنی و توزیع ریز و یکنواخت این ترکیبات نیاز به نرخ گرم کردن نسبتاً پایین، مثلاً ۵۷۵ °C در ساعت است . مشاهده شده است که این ترکیبات در واقع بر روی سطوح ذرات رسوبی تشکیل شده جوانه زنی کرده و سپس در خلال گرم کردن آهسته تا اندازه های نسبتاً درشت رشد می نمایند. وقتی که این ترکیبات کوچکتر از میکرون تشکیل شدند در دمای همگن کردن پایدار می مانند در حالی که رسوبات حل می شوند .

### طبقه بندی و نامگذاری حالت آلیاژهای آلومینیوم :

در خلال سالهای اولیه صنعت آلومینیوم هر آلیاژ جدیدی که ساخته و پرداخته می شد، به وسیله کمپانی های سازنده و به اسامی مورد قبول آن ها نامگذاری می گردید و هیچ گونه نامگذاری بین المللی وجود نداشت. بعدها به تدریج سه گروه کلی نام گذاری عمومی یافت که عبارت بودند از :

سیستم تجاری، سیستم ASTM و سیستم SAE مثلاً آلیاژی که امروزه آلیاژ آلومینیوم هزار و صد نامیده می شود در سیستم تجاری S2 ، در سیستم ASTM ۹۹۰A و در سیستم SAE ، بیست و پنج نامیده می شد. به همین ترتیب در سایر کشورها نیز سیستمهای قرار دادی دیگر مورد استفاده قرار می گرفت واضح است که یک چنین اسامی مختلف و در همی برای صنعت نامناسب است. به ناچار یک سیستم مشخص تر و استاندارد تر به اسم AA برای آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم یعنی آلیاژهایی که از طریق مکانیکی به شکل لازم در می آیند، نه از طریق ریخته گری، پیشنهاد و اکنون مورد استفاده قرار می گیرد. در این سیستم نامگذاری ، آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم بر اساس عناصر آلیاژی اصلی خود به هشت گروه مختلف تقسیم می گردند. مشخصات کامل آلیاژ بوسیله ۴ عدد از هم تفکیک می گردد. رقم اول از سمت چپ نشان دهنده گروه اصلی آلیاژی است . دومین رقم تغییر آلیاژ نسبت به آلیاژ اولیه را نشان می دهد. سومین و چهارمین رقم، مقدار خلوص یا نوع آلیاژ را مشخص می کند .

با توجه به اینکه رقم اول بر مبنای عنصر(عناصر) آلیاژی اصلی می باشد بنابراین گروه آلیاژی ۱\*\*\* آلومینیوم آلیاژ نشده (با حداقل ۹۹٪ آلومینیوم )، گروه ۲\*\*\* حاوی مس به عنوان عنصر آلیاژی، گروه ۳\*\*\* حاوی منگنز، گروه ۴\*\*\* حاوی سیلیسیم ، گروه ۵\*\*\* حاوی منیزیم، گروه ۶\*\*\* حاوی منیزیم و سیلیسیم و گروه ۷\*\*\* حاوی روی و (منیزیم) به عنوان عناصر اصلی آلیاژی می باشند. رقم های سوم و چهارم در گروه ۱\*\*\* دارای اهمیت بیشتری است ولی در گروه های دیگر کمتر اهمیت دارند. در گروه آلیاژی ۱\*\*\*،

حداقل خلوص آلومینیوم به وسیله این رقم ها مشخص می شود مثلاً ۱۱۴۵ دارای حداقل خلوص ۹۹/۴۵٪ است. ۱۲۰۰ دارای حداقل خلوص ۹۹/۰۰٪ است. در سایر گروه های آلیاژی رقم های سوم و چهارم صرفاً به مانند یک شماره سریال عمل می کنند بنابراین آلیاژهای ۳۰۰۳، ۳۰۰۴، ۳۰۰۵ آلیاژهای متفاوت-AL را MN هستند و به همین ترتیب آلیاژهای ۵۰۸۲ و ۵۰۸۳ آلیاژهای مختلف گروه های آلیاژی AL-MG را نشان می دهند.

بنابراین از گروه\*\*\*۲ تا \*\*\*۸ که به عنوان آلیاژهای واقعی آلومینیوم شناخته می شوند، اعداد سوم و چهارم از سمت چپ فقط جهت تفکیک آلیاژها در یک گروه از هم بکار می روند. رقم دوم مانند قبل نشان دهنده تغییر یا کنترل خاصی بر روی آلیاژ است. اگر این رقم صفر باشد به معنی این است که در آلیاژ مربوطه از ابتدای ثبت آن تغییری داده نشده است. مانند آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱. اعداد ۱ تا ۹ نشان دهنده تغییر یا اصلاح آلیاژ اولیه است و خود عدد نشان دهنده مرحله تغییر است. مثلاً آلیاژ ۲۲۱۸ به معنی دومین تغییر در آلیاژ ۲۰۱۸ است، یعنی اینکه ترکیب آلیاژ همان ترکیب ۲۰۱۸ می باشد، باستثناء اینکه مقدار منیزیم آن حدوداً به ۲ برابر مقدار اولیه آن رسیده است.

### آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی **Non-Heat-treatable alloys** :

ترکیبات آلیاژهای کاربردی که به عملیات حرارتی عکس العمل نشان نمی دهد اساساً از انواع آلومینیوم و آلیاژهای حاوی منگنز یا منیزیم به عنوان عنصر اصلی آلیاژی بصورت تنها یا در ترکیب با هم تشکیل می شوند. تقریباً ۹۵٪ کل محصولات نورد شده آلومینیومی (ورق، صفحه، زورق) از این سه گروه آلیاژی تشکیل شده اند. در این آلیاژها استحکام از طریق کرنش سختی و معمولاً بصورت کاربرد در خلال شکل دادن به قطعه، به همراه سختی پراکندگی (AL-MN) یا استحکام بخشی توسط محلول های جامد-AL (MG) و یا هر دو این روش ها (AL-MN-MG) حاصل می شود. آلیاژهای گروه \*\*\*۸ اغلب به عملیات حرارتی عکس العمل نشان نمی دهند و برای موارد خاص مانند یاتاقان ها و درپوش بطری استفاده دارند.

#### ۱) آلومینیوم خیلی خالص و آلومینیوم با خلوص تجارتي (گروه\*\*\*۱) :

این گروه آلیاژی شامل آلومینیوم پرخلوص (SP) (۹۹/۹۹٪) و انواع آلومینیوم های با خلوص تجاری (CP) حاوی تا ۱٪ ناخالصی یا عناصر افزودنی جزئی است. خواص کششی این آلیاژها پایین بوده و آلومینیوم پر خلوص آنیل شده دارای تنش سیلان ۷-۱۱ MPA است.

#### ۲) آلیاژهای AL-MN و AL-MN-MG (گروه\*\*\*۱) :

گرچه حلالیت جامد منگنز در آلومینیوم ۱/۸۲٪ است ولی آلیاژهای تجاری AL-MN حاوی تا ۱/۲۵٪ MN می باشند. این محدودیت به این علت است که حضور آهن به عنوان عنصر ناخالصی باعث کاهش حلالیت شده و این خطر وجود دارد که ذرات درشت اولیه تشکیل شود که به روی انعطاف پذیری موضعی تاثیر بسیار بدی می گذارد.

بطور کلی گروه آلیاژی \*\*\*۳ در مواردی مصرف می شود که استحکام متوسط به همراه انعطاف پذیری بالا و مقاومت خوردگی خوب مورد نیاز است .

### ۳) آلیاژهای AL-MG (گروه \*\*\*۵) :

آلومینیوم و منیزیم در محدوده وسیعی از ترکیب شیمیایی تشکیل محلول های جامد داده و آلیاژهای کارپذیر حاوی از  $MG \ 0.8\%$  تا کمی بیشتر از  $MG \ 5\%$  ایجاد می کنند که موارد مصرف وسیعی دارند. آلیاژهای AL-MG موارد مصرف زیادی در ساخت قطعات جوش شده پیدا کرده اند . مقاومت خوردگی بالاتر این آلیاژها آنها را برای بدنه قایق های کوچک و ساختمان اصلی کشتی های اقیانوس پیما مناسب می گرداند به علاوه این آلیاژها را می توان بخوبی صیقل داد و براق نمود.

### ۴) آلیاژهای متفرقه (گروه \*\*\*۸) :

این گروه آلیاژی مشتمل است بر تعداد زیادی آلیاژهای رقیق مانند  $(0.6) - NI1/1-AL \ 8001$  که در تاسیسات انرژی هسته ای که مقاومت خوردگی در مقابل آب در دما و فشار بالا مورد نیاز است کاربرد دارند. خواص مکانیکی آن مشابه آلیاژ ۳۰۰۳ است.

آلیاژ  $8011 (Si7/0-Fe75/0-AL)$  به دلیل کیفیت کشش عمیق خوب برای ساخت درب بطری بکار می رود. آلیاژهایی مانند  $8280$  و  $8081$  به عنوان آلیاژهای باتاقان بر پایه سیستم AL-SN نقش مهمی داشته و امروزه در اتومبیل و کامیونها، مخصوصاً جائی که موتور دیزلی بکار می رود مورد مصرف زیادی یافته است .

### آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر Heattreatable alloys:

آلیاژ های کار شده ای که در اثر عملیات حرارتی مقاوم می شوند در سه گروه

۲\*\*\* (AL-CU) ۶\*\*\*، (AL-MG-SI) ۷\*\*\*، (AL-ZN-MN,AL-ZN-MG-CU) قرار

می گیرند تمام این آلیاژها وابسته به عملیات پیر سختی که باعث تقویت قابل توجه خواص کششی می گردد بوده و به ۲ دسته تقسیم می گردند: آلیاژهایی که دارای استحکام متوسط بوده و به آسانی جوش پذیرند  $(AL-MG-SI,AL-ZN-MG)$ ، و آلیاژهای استحکام بالا که اساساً برای ساختمان هواپیماها تولید می شوند  $(AL-CU,AL-CU-MG,AL-ZN-MG-CU)$  و اغلب آنها جوش پذیری محدودی دارند .

### آلیاژهای AL-CU (گروه \*\*\*۲) :

مس یکی دیگر از عناصر مهم آلیاژی آلومینیوم است. این عنصر در درجه حرارت  $548^{\circ}C$  به مقدار نسبتاً قابل توجهی  $(6/65\%)$  در آلومینیوم جامد محلول است. اغلب آلیاژهای آلومینیوم - مس، عملیات حرارتی پذیر بوده و از این نظر تاثیر مس در آنها حائز اهمیت است .

## آلیاژ AL-CU-MG (گروه ۲\*\*\*):

تاریخ پیدایش این آلیاژها به کشف تصادفی پدیده پیر سختی توسط Alfred Wilm که در سال ۱۹۰۶ در برلین مشغول تحقیقات برای تولید مشخصات آلیاژ آلومینیومی که بتواند جایگزین برنج در ساخت پوکه فشنگ شود بر می گردد. کار این دانشمند منجر به تولید آلیاژی بنام دور آلومین-۹/۰-SI۹/۰-(MN)۸/۰ (AL)۳/۳-CU۵/۰-MG۵/۰ گردید که به سرعت به عنوان اجزاء ساختمانی هوانورد زیپلین و بعدها در ساخت هواپیما مورد استفاده قرار گرفت .

## آلیاژهای AL-ZN-MG (گروه ۷\*\*\*):

سیستم AL-ZN-MG در بین کلیه آلیاژهای آلومینیوم بالاترین پتانسیل پیر سخت شدن را دارند، اگر چه آلیاژهای خیلی پر استحکام همیشه حاوی یک عنصر چهارم (مس) برای بهبود مقاومت در مقابل ترک خوردگی تنش هستند . آلیاژهای جوش پذیر AL-ZN-MG برای اولین بار به منظور ساخت پل های سبک نظامی تولید گردیدند ولی امروزه دارای موارد مصرف تجاری متعددی بخصوص در اروپا هستند. در جاهای دیگر، موارد استفاده آن ها به دلیل ترس از ترک خوردگی تنش در منطقه جوش گسترش کمتری یافته است .

## آلیاژ AL-ZN-MG-CU (گروه ۷\*\*\*):

این آلیاژها توجه خاصی را به خود جلب کرده اند زیرا مدتی است مشخص شده که این گروه آلیاژی در بین کلیه آلیاژهای آلومینیوم بیشترین عکس العمل در مقابل پیر سختی را از خود نشان می دهند این آلیاژ و دیگر آلیاژهای این گروه بعلت مستعد بودن به ترک خوردگی تنش برای موارد ساختمانی نامناسب می باشند .

آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر گروه ۶\*\*\* به دلیل اهمیتی که در موضوع پروژه دارند ، بعد از موضوع نامگذاری حالت آلیاژهای آلومینیوم مورد بحث قرار خواهند گرفت .