

سوپر آلیاژ پایه نیکل :

مقدمه:

سوپر آلیاژها، آلیاژهای مقاوم به گرما در دمای بالا هستند و قادرند که استحکام خود را در دماهای بالا حفظ نمایند. سوپر آلیاژها همچنین مقاومت خوبی به خوردگی و اکسایش و مقاومت زیادی به خزش و شکست در دمای بالا دارند. بطور کلی سه دسته اساسی سوپر آلیاژ وجود دارد: ۱- پایه نیکل ۲- پایه نیکل / آهن ۳- پایه کبالت

اولین آلیاژ پایه نیکل قابل رسوب سختی Nimonic ۸۰ در سال ۱۹۴۱ در بریتانیای کبیر توسعه یافت. این آلیاژ محلول جامد Al, Ni, Ti, Cr با ترکیب (Ti, Al_3Ni) که عمدتاً دارای رسوبات با ترکیب (Ti, Al_3Ni) میباشد. وسیعترین کاربرد سوپر آلیاژها مربوط به صنایع هواپیما و توربینهای گازی است، ماشینهای فضایی، موتور موشک، هواپیماهای آزمایشی راکتورهای هسته ای، زیردریاییها، دیگهای بخار، تجهیزات پتروشیمی و...

تقسیم بندی سوپر آلیاژهای پایه نیکل:

(۱) تقسیم بندی سوپر آلیاژ نیکل بر اساس ذوب:

الف- آلیاژهای اولیه ذوب شونده در هوا

ب- آلیاژهای جدید ذوب شونده در هوا

ج- آلیاژهای اولیه ذوب در خلا

د- آلیاژهای ذوب شونده در خلا با استحکام بالا

(۲) تقسیم بندی سوپر آلیاژهای نیکل بر حسب ترکیب شیمیایی:

۱- آلیاژهای با Mo بالا

۲- آلیاژها با $(Ni-Cr)$ (۷۵-۱۵)

۳- آلیاژها با $(Ni-Cr)$ (۷۵-۲۰)

۴- آلیاژها با $(Ni-Cr-Co)$ (۳۵-۶۰), (۲۰-۲۰)

۵- آلیاژها با درصد مختلف از Ni, Cr, Co, Mo

۶- آلیاژهای اصلاح شده گروه پنج با کبالت کمتر

۷- آلیاژهای اصلاح شده گروه پنج با آهن بیشتر و کبالت کمتر

۸- آلیاژهای اصلاح شده گروه یک با آهن زیاد و مولیبدن کم

گروه یک سوپر آلیاژ نیکل:

بیشتر از $Mo/15$ داشته. دارای مقاومت خوبی در برابر اسیدها می باشند. مثلاً: Hastelloy B آلیاژی بود که برای ساخت پره های تولید شده از طریق فورج در موتور توربین -۱۶I بکار رفت.

گروه دو سوپر آلیاژ نیکل:

دارای $Cr, 10\%Ni, 75\%$ عناصر دیگر می باشد. قابل رسوب سختی می باشند. بعضی از آلیاژهای این گروه در دو مرحله پیر سختی می شوند.

کار سرد میتواند سبب افزایش استحکام در کاربردهای با دمای پائین تر گردد که در این حالت مواد می توانند به سادگی تنش زدایی شوند. تولیدات کار سرد و کشش سرد در حدود f_{1800} انیل می شوند.

گروه سوم سوپر آلیاژ نیکل:

این آلیاژها در انگلستان توسعه یافته و بر مبنای آلیاژ نیکروم ($Cr_{20}Ni_{80}$) که به میزان زیادی برای ساخت المنتهای کوره های الکتریکی بکار می رود، طراحی گردیدند.

گروه چهارم سوپر آلیاژ نیکل:

مشابه گروه دو و سه بوده بجز آنکه با کاهش Ni حدود $20\%Co$ افزوده گردیده. نسبت به گروههای قبلی استحکام خزش-گسیختگی بیشتری دارد.

گروه پنجم سوپر آلیاژ نیکل:

با چهار گروه قبلی متفاوتند. دارای حدود 3% یا بیشتر Mo می باشند. به منظور ساخت اجزاء توربین گازی، نظیر پره های توربین، دیسکها، پره های هدایت کننده، محفظه احتراق، پس سوزو... استفاده می شوند. برای ساخت اجزائی که در دمای بالا بکار رفته و نیازمند استحکام بالا در دماهای بالا می باشند مناسب اند.

گروه ششم سوپر آلیاژ نیکل:

بسیار شبیه گروه پنج بوده با مقدار کبالت بسیار کم و درصد Ni بالاتر مانند ترکیب گروه های $2,3$ با بیش از $4\%Mo$ یا W می باشند. در نتیجه استحکام خزش-گسیختگی بیشتری نسبت به گروه دو و سه دارند.

گروه هفتم سوپر آلیاژ نیکل:

افزایش مقدار آهن بیش از 15% و کاهش کبالت و کاهش میزان نیکل برای ساخت قطعات پیچیده از طریق جوشکاری و ورقها که نیاز به ترکیبی از قابلیت ساخت عالی، استحکام در دماهای بالا و مقاومت اکسیداسیون دارند مناسب اند.

گروه هشتم سوپر آلیاژ نیکل:

$(17-20)\%Fe$ و Mo کمتر از 10% داشته

استحکام خزش-گسیختگی این گروه باندازه سایر گروهها نمی باشد اما مزیتهای آن قیمت پائین تر و ساخت آسانتر می باشد. برخی از کاربرد های این آلیاژ در دماهای بالا، قطعات کوره ها و کاربرد در اجزاء موتور هواپیما نظیر پس سوز، پره های توربین، پره های هدایت کننده و...

معرفی و به کار گیری سوپر آلیاژها

چکیده: طراحان نیاز فراوانی به مواد مستحکم تر و مقاوم تر در برابر خوردگی دارند. فولادهای زنگ نزن توسعه داده شده و به کار رفته در دهه‌های دوم و سوم قرن بیستم میلادی، نقطه شروعی برای برآورده شدن خواسته‌های مهندسی در دماهای بالا بودند. بعداً معلوم شد که این مواد تحت این شرایط دارای استحکام محدودی هستند. جامعه متالوژی با توجه به نیازهای روز افزون بوجود آمده، با ساخت جایگزین فولاد زنگ نزن که سوپر آلیاژ نامیده شد به این تقاضا پاسخ داد. البته قبل از سوپر آلیاژها مواد اصلاح شده پایه آهن به وجود آمدند، که بعدها نام سوپر آلیاژ به خود گرفتند. با شروع و ادامه جنگ جهانی دوم توربین‌های گازی تبدیل به یک محرک قوی برای اختراع و کاربرد آلیاژها شدند. در سال ۱۹۲۰ افزودن آلومینیوم و تیتانیوم به آلیاژهای از نوع نیکروم به عنوان اختراع به ثبت رسید، ولی صنعت سوپر آلیاژها با پذیرش آلیاژ کبالت (ویتالیوم) برای برآورده کردن نیاز به استحکام در دمای بالا در موتورهای هواپیما پدیدار شدند. بعضی آلیاژهای نیکل-کروم (اینکونل و نیمونیک) مانند سیم نسوز کم و بیش وجود داشتند و کار دستیابی به فلز قوی‌تر در دمای بالاتر برای رفع عطش سیری ناپذیر طراحان ادامه یافت و هنوز هم ادامه دارد.

متن مقاله :

سوپر آلیاژها؛ آلیاژهای پایه نیکل، پایه آهن-نیکل و پایه کبالت هستند که عموماً در دماهای بالاتر از 540°C استفاده می‌شوند. سوپر آلیاژهای پایه آهن-نیکل مانند آلیاژ ۷۱۸IN از فن‌آوری فولادهای زنگ نزن توسعه یافته و معمولاً به صورت کار شده می‌باشند. سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت بسته به نوع کاربرد و ترکیب شیمیایی می‌توانند به صورت ریخته یا کار شده باشند. در شکل ۱-۱ رفتار تنش-گسیختگی سه گروه آلیاژی با یکدیگر مقایسه شده‌اند (سوپر آلیاژهای پایه آهن-نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت). در جدولهای ۱-۱ و ۲-۱ فهرستی از سوپر آلیاژها و ترکیب شیمیایی آنها آورده شده است.

سوپر آلیاژهای دارای ترکیب شیمیایی مناسب را می‌توان با آهنگری و نورد به اشکال گوناگون در آورد. ترکیب‌های شیمیایی پر آلیاژتر معمولاً به صورت ریخته‌گری می‌باشند. ساختارهای سرهم بندی شده را می‌توان با جوشکاری یا لحیم‌کاری بدست آورد، اما ترکیب‌های شیمیایی که دارای مقادیر زیادی از فازهای سخت کننده هستند، به سختی جوشکاری می‌شوند. خواص سوپر آلیاژها را با تنظیم ترکیب شیمیایی و فرآیند (شامل عملیات حرارتی) می‌توان کنترل کرد و استحکام مکانیکی بسیار عالی درمحصول تمام شده بدست آورد.

۱-۲- مروری کوتاه بر فلزات با استحکام در دمای بالا

استحکام اکثر فلزات در دماهای معمولی به صورت خواص مکانیکی کوتاه مدت مانند استحکام تسلیم یا نهایی اندازه‌گیری و گزارش می‌شود. با افزایش دما به ویژه در دماهای بالاتر از ۵۰ درصد دمای نقطه ذوب (بر حسب دمای مطلق) استحکام باید بر حسب زمان انجام اندازه‌گیری بیان شود. اگر در دماهای بالا باری به

فلز اعمال شود که به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از بار منجر به تسلیم در دمای اتاق باشد، دیده خواهد شد که فلز به تدریج با گذشت زمان ازدیاد طول پیدا می‌کند. این ازدیاد طول وابسته به زمان خزش نامیده می‌شود و اگر به اندازه کافی ادامه یابد به شکست (گسیختگی) قطعه منجر خواهد شد. استحکام خزش یا استحکام گسیختگی (در اصطلاح فنی استحکام گسیختگی خزش یا استحکام گسیختگی تنشی نامیده می‌شود) همانند استحکام‌های تسلیم و نهایی در دمای اتاق یکی از مولفه‌های مورد نیاز برای فهم رفتار مکانیکی ماده است. در دماهای بالا استحکام خستگی فلز نیز کاهش پیدا می‌کند. بنابراین برای ارزیابی توانایی فلز با در نظر گرفتن دمای کار و بار اعمال شده لازم است، استحکام‌های تسلیم و نهایی، استحکام خزش، استحکام گسیختگی و استحکام خستگی معلوم باشند. ممکن است به خواص مکانیکی مرتبط دیگری مانند مدول دینامیکی، نرخ رشد ترک و چقرمگی شکست نیز نیاز باشد. خواص فیزیکی ماده مانند ضریب انبساط حرارتی، جرم حجمی و غیره فهرست خواص را تکمیل می‌کنند.

۱-۳- اصول متالورژی سوپر آلیاژها

سوپر آلیاژهای پایه آهن، نیکل و کبالت معمولاً دارای ساختار بلوری با شکل مکعبی با سطوح مرکزدار (FCC) هستند. آهن و کبالت در دمای محیط دارای ساختار FCC نیستند. هر دو فلز در دماهای بالا یا در حضور عناصر آلیاژی دیگر دگرگونی یافته و شبکه واحد آنها به FCC تبدیل می‌شود. در مقابل، ساختمان بلوری نیکل در همه دماها به شکل FCC است. حد بالایی این عناصر در سوپر آلیاژها توسط دگرگونی فازها و پیدایش فازهای آلوتروپیک تعیین نمی‌شود بلکه توسط دمای ذوب موضعی آلیاژها و انحلال فازهای استحکام یافته تعیین می‌گردد. در ذوب موضعی بخشی از آلیاژ که پس از انجماد ترکیب شیمیایی تعادلی نداشته است در دمایی کمتر از مناطق مجاور خود ذوب می‌شود. همه آلیاژها دارای یک محدوده دمایی ذوب شدن هستند و عمل ذوب شدن در دمای ویژه‌ای صورت نمی‌گیرد، حتی اگر جدایش غیر تعادلی عناصر آلیاژی وجود نداشته باشد. استحکام سوپر آلیاژها نه تنها بوسیله شبکه FCC و ترکیب شیمیایی آن، بلکه با حضور فازهای استحکام دهنده ویژه‌ای مانند رسوبها افزایش می‌یابد. کار انجام شده بر روی سوپر آلیاژ (مانند تغییر شکل سرد) نیز استحکام را افزایش می‌دهد، اما این استحکام به هنگام فرارگیری فلز در دماهای بالا حذف می‌شود.

تمایل به دگرگونی از فاز FCC به فاز پایدارتری در دمای پایین وجود دارد که گاهی در سوپر آلیاژهای کبالت اتفاق می‌افتد. شبکه FCC سوپر آلیاژ قابلیت انحلال وسیعی برای بعضی عناصر آلیاژی دارد و رسوب فازهای استحکام دهنده (در سوپر آلیاژهای پایه آهن- نیکل و پایه نیکل) انعطاف‌پذیری بسیار عالی آلیاژ را به همراه دارد. چگالی آهن خالص 7.87 gr/cm^3 و چگالی نیکل و کبالت تقریباً 8.9 gr/cm^3 می‌باشد. چگالی سوپر آلیاژهای پایه آهن- نیکل تقریباً $7.9-8.3 \text{ gr/cm}^3$ پایه کبالت $8.3-9.4 \text{ gr/cm}^3$ و پایه نیکل $7.8-8.9 \text{ gr/cm}^3$ است.

چگالی سوپر آلیاژها به مقدار عناصر آلیاژی افزوده شده بستگی دارد. عناصر آلیاژی Cr, Ti و Al چگالی را کاهش و Re, W و Ta آنرا افزایش می‌دهند. مقاومت به خوردگی سوپر آلیاژها نیز به عناصر آلیاژی افزوده شده به ویژه Cr, Al و محیط بستگی دارد.

دمای ذوب عناصر خالص نیکل، کبالت و آهن به ترتیب ۱۴۵۳ و ۱۴۹۵ و ۱۵۳۷ درجه سانتی‌گراد است. دمای ذوب جداقل (دمای ذوب موضعی) و دامنه ذوب سوپر آلیاژها، تابعی از ترکیب شیمیایی و فرآیند اولیه است. به طور کلی دمای ذوب موضعی سوپر آلیاژهای پایه کبالت نسبت به سوپر آلیاژهای پایه نیکل بیشتر است. سوپر آلیاژهای پایه نیکل ممکن است در دمای 1204°C از خود ذوب موضعی نشان دهند. انواع پیشرفته سوپر آلیاژهای پایه نیکل تک بلور دارای مقادیر محدودی از عناصر کاهش دهنده دمای ذوب هستند و به همین لحاظ، دارای دمای ذوب موضعی برابر یا کمی بیشتر از سوپر آلیاژهای پایه کبالت هستند.

۱-۴- بعضی از ویژگیها و خواص سوپر آلیاژها

۱- فولادهای معمولی و آلیاژهای تیتانیوم در دماهای بالاتر 540°C دارای استحکام کافی نیستند و امکان خسارت دیدن آلیاژ در اثر خوردگی وجود دارد.

۲- چنانچه استحکام در دماهای بالاتر (زیر دمای ذوب که برای اکثر آلیاژها تقریباً $1371-1204$ درجه سانتیگراد است) مورد نیاز باشد، سوپر آلیاژهای پایه نیکل انتخاب می‌شوند.

۳- از سوپر آلیاژهای پایه نیکل می‌توان در نسبت دمایی بالاتری (نسبت دمای کار به دمای ذوب) در مقایسه با مواد تجاری موجود استفاده کرد. فلزات دیرگداز (نسوز) نسبت به سوپر آلیاژها دمای ذوب بالاتری دارند ولی سایر خواص مطلوب آنها را ندارند و به همین خاطر به طور وسیعی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

۴- سوپر آلیاژهای پایه کبالت را می‌توان به جای سوپر آلیاژهای پایه نیکل استفاده کرد که این جایگزینی به استحکام مورد نیاز و نوع خوردگی بستگی دارد.

۵- در دماهای پایین‌تر وابسته به استحکام مورد نیاز، سوپر آلیاژهای پایه آهن- نیکل نسبت به سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند.

۶- استحکام سوپر آلیاژ نه تنها مستقیماً به ترکیب شیمیایی بلکه به فرآیند ذوب، آهنگری و روش شکل‌دهی، روش ریخته‌گری و بیشتر از همه به عملیات حرارتی پس از شکل‌دهی، آهنگری یا ریخته‌گری بستگی دارد.

۷- سوپر آلیاژهای پایه آهن- نیکل نسبت به سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت ارزان‌تر هستند.

۸- اکثر سوپر آلیاژهای کار شده برای بهبود مقاومت خوردگی دارای مقداری کروم هستند. مقدار کروم در آلیاژهای ریخته در ابتدا زیاد بود، اما به تدریج مقدار آن کاهش یافت تا عناصر آلیاژی دیگری برای افزایش خواص مکانیکی سوپر آلیاژهای دما بالا، به آنها افزوده شوند. در سوپر آلیاژهای پایه نیکل با کاهش کروم

مقدار آلومینیوم افزایش یافت، در نتیجه مقاومت اکسیداسیون آنها در همان سطح اولیه باقی می‌ماند و یا افزایش می‌یابد، اما مقاومت در برابر انواع دیگر خوردگی کاهش می‌یابد.

۹- سوپر آلیاژها مقاومت در برابر اکسیداسیون بالایی دارند اما در بعضی موارد مقاومت خوردگی کافی ندارند. در کاربردهایی مانند توربین هواپیما که دما بالاتر از 760°C است سوپر آلیاژها باید دارای پوشش باشند. سوپر آلیاژها در کاربردهای طولانی مدت در دماهای بالاتر از 649°C مانند توربین‌های گازی زمینی می‌توانند پوشش داشته باشند.

۱۰- فن آوری پوشش‌دهی سوپر آلیاژها بخش مهمی از کاربرد و توسعه آنها می‌باشد. نداشتن پوشش به معنی کارایی کم سوپر آلیاژ در دراز مدت و دماهای بالا است.

۱۱- در سوپر آلیاژها به ویژه در سوپر آلیاژهای پایه نیکل بعضی از عناصر در مقادیر جزئی تا زیاد اضافه شده‌اند. در بعضی از آلیاژها تعداد عناصر کنترل شده موجود تا ۱۴ عنصر و بیشتر می‌تواند باشد.

۱۲- نیکل، کبالت، کروم، تنگستن، مولیبدن، رنیم، هافنیم و دیگر عناصر استفاده شده در سوپر آلیاژها اغلب گران بوده و مقدارشان در طی زمان متغیر است.

۱-۵- کاربردها

کاربرد سوپر آلیاژها در دماهای بالا بسیار گسترده و شامل قطعات و اجزاء هواپیما، تجهیزات شیمیایی و پتروشیمی است. موتور $119F$ که یکی از آخرین موتورهای هواپیماهای نظامی است، نشان داده شده است. دمای گاز در بخش داغ موتور (ناحیه خروجی موتور) ممکن است به دمایی بالاتر از 1093°C برسد. با استفاده از سیستمهای خنک کننده دمای اجزاء فلزی کاهش پیدا می‌کند و سوپر آلیاژ که توانایی کار کردن در این دمای بالا را دارد، جزء اصلی بخش داغ به شمار می‌رود.

اهمیت سوپر آلیاژها در تجارت روز را می‌توان با یک مثال نشان داد. در سال ۱۹۵۰ فقط ۱۰ درصد از کل وزن توربین‌های گاز هواپیما از سوپر آلیاژها ساخته می‌شد، اما در سال ۱۹۸۵ میلادی این مقدار به ۵۰ درصد رسید.

در جدول ۱-۳ فهرستی از کاربردهای جاری سوپر آلیاژها آورده شده است. باید خاطر نشان ساخت، که همه کاربردها به استحکام در دمای بالا نیاز ندارند. ترکیب و مقاومت خوردگی سوپر آلیاژها، مواد استاندارد برای ساخت وسایل پزشکی بوجود آورده است. سوپر آلیاژها همچنین کاربردهایی در دماهای بسیار پایین پیدا کرده‌اند.

انتخاب سوپر آلیاژها

۱-۲- کلیات

در جدولهای ۱-۲ و ۲-۲ داده‌هایی درباره تنش گسیختگی سوپر آلیاژها آورده شده است. با مراجعه به شکل ۱-۱ می‌توانید یک نگاه کلی بر روی تنش گسیختگی سوپر آلیاژها داشته باشید. جمع‌آوری اطلاعات بیشتر به داده‌های ارائه شده، از طرف سازندگان و نیز دسترسی به اطلاعات فنی منتشر شده بستگی دارد. به استثناء محصولات نورد شده مانند ورق و میل به بقیه محصولات قطعاً نمی‌توان انتظار داشت، که ترکیب شیمیایی بدست آمده، از آزمون در آزمایشگاه‌های مختلف با یکدیگر برابر و یکسان باشند. ریز ساختار تنها عامل مهم در تعریف و تعیین خواص مکانیکی سوپر آلیاژهاست. تغییر ریز ساختار به معنی تغییر خواص و نتایج آزمون است. بدون توجه به ریز ساختار و شرایط آزمون نتایج بدست آمده، از آزمایش ترکیب شیمیایی از نوع آماری خواهند بود. دنبال کردن و نتیجه‌گیری از داده‌ها در هر آلیاژی کاری دشوار است.

۲-۲- شکل سوپر آلیاژها

سوپر آلیاژها به صورت ریخته (معمولاً عملیات حرارتی شده یا تحت فرآیندهای دیگر قرار گرفته) و یا کار شده (اغلب عملیات حرارتی شده یا تحت فرآیندهای دیگر قرار گرفته) هستند. محصولات ریخته ممکن است به صورت شمش برای ذوب مجدد، یا کار مجدد، مانند آهن‌گری و یا به شکل محصول نیمه تمام مشابه محصول نهایی باشند. محصولات کار شده اغلب، در حد واسط شکل نهایی مانند، محصولات نورد شده شامل میل، ورق، سیم، صفحه و غیره قرار دارند.

یکی از مسائل مهم متالوژی سوپر آلیاژها در قرن بیستم، تولید شکل نهایی یا نزدیک به آن محصولات کار شده بود. (اشکال ریخته نهایی به روش ریخته‌گری دقیق چندین دهه است که تولید می‌شوند). در نتیجه تلاش‌های به عمل آمده، فهم کامل فرآیندهای کار گرم و کار سرد، با استفاده از رایانه و به کار بردن فن‌آوری‌های جدید، طراحان را قادر ساخت که شکل محصولات را تا حد ممکن به شکل نهایی نزدیک گردانند.

۲-۳- دمای کاری سوپر آلیاژها

همانگونه که گفته شد، سوپر آلیاژها عموماً برای کار در دماهای بالاتر از 540°C و کمتر از نقطه ذوب که معمولاً بالاتر از 1204°C است، مناسب هستند.

آلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل عموماً دارای حد دمایی در حدود 816°C هستند. در دماهای بالاتر از این حد از آلیاژهای ریخته استفاده می‌شود. استحکام اکثر سوپر آلیاژها توسط رسوب فاز ثانویه افزایش پیدا می‌کند، و حد بالایی محدوده دمایی استفاده از آلیاژ تحت تاثیر نوع پایه آلیاژ (پایه نیکل یا پایه آهن- نیکل) مقدار و نوع رسوب و شکل آلیاژ (ریخته یا کار شده) است.

امروزه در صنعت سوپر آلیاژها کاملاً مشخص است که از چه نوع آلیاژ ویژه‌ای برای کار در یک دمای مشخص استفاده شود. به عنوان مثال اکثر سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل کار شده، فقط در دماهای 704°C - 649°C مورد استفاده قرار می‌گیرند. محدوده دمایی بعضی از سوپر آلیاژها در دمای زیر 540°C و اکثراً کمتر از 427°C شروع می‌شود. سوپر آلیاژهای کار شده در توربین‌های گازی استفاده می‌شوند، زیرا آلیاژهای تیتانیوم برای این کار مناسب نیستند. آلیاژهای ریخته در بیشترین دما می‌توانند کار کنند و از آنها در موتورهای توربین استفاده می‌شود.

سوپر آلیاژها معمولاً دارای یک ویژگی مقدم بر دیگر ویژگی‌ها هستند. در یک ترکیب شیمیایی مشابه، اگر به صورت ریخته یا کار شده استفاده شوند ممکن است عملیات حرارتی متفاوتی بر روی آنها انجام گیرد. زمانی که یک سوپر آلیاژ به همان شکل تولید شده استفاده می‌شود برای بهینه کردن یکی از ویژگی‌های آن می‌توان از یک عملیات فرآیندی استفاده کرد. به عنوان مثال آلیاژ Waspaloy کار شده در ساخت دیسک توربین گاز استفاده می‌شود. با تنظیم شرایط فرآیند تولید این آلیاژ می‌توان با عملیات حرارتی فرآیندی استحکام تسلیم و در نتیجه استحکام گسیختگی خزش آن را بهبود بخشید.

۲-۴- مقایسه سوپر آلیاژهای ریخته و کار شده

۲-۴-۱- سوپر آلیاژهای کار شده

یک آلیاژ کار شده معمولاً از شمش‌های ریخته به دست می‌آید اما چندین بار تغییر شکل و عملیات پیش گرم روی آن انجام می‌شود، تا به حالت نهایی خود برسد. آلیاژهای کار شده به مراتب همگن‌تر از آلیاژهای ریخته که معمولاً دارای جدایش ناشی از فرآیند انجماد هستند می‌باشند. جدایش نتیجه طبیعی انجماد آلیاژ است، اما در بعضی از موارد به صورت شدیدتری روی می‌دهد.

آلیاژهای کار شده، معمولاً انعطاف‌پذیرتر از آلیاژهای ریخته هستند. محصولات نورد مانند میله‌ها از نوع کار شده هستند. انعطاف‌پذیری آلیاژ باعث می‌شود که بتوان آنها را به قطعات و اشکال بهتری درآورد. قطعات آهنگری نیز محصولات کار شده هستند که مزیت انعطاف‌پذیری بالاتر ماده کار شده برای تولید اشکال بزرگتر مانند، دیسک‌های توربین‌های گازی را دارند.

هر آلیاژ را نمی‌توان به شکل کار شده در آورد. بعضی از قطعات فقط به صورت ریخته تولید می‌شوند. آلیاژهایی که کارپذیری خیلی کمی دارند، ابتدا با متالورژی پودر تولید شده و سپس آهنگری می‌شوند. برای ساخت دیسک‌های سنگین که در ناحیه دماهای متوسط توربین گازی کار می‌کنند، از آلیاژهای متالورژی پودر و یا آلیاژهای کار شده استفاده می‌شود. با فرآیند متالورژی پودر می‌توان قطعاتی تولید کرد که مستقیماً ماشین‌کاری شوند.

۲-۴-۲- سوپر آلیاژهای ریخته

سوپر آلیاژهای ریخته در ناحیه دما بالای توربین‌های گاز، به ویژه در قطعاتی نظیر پره‌های هوا یافت می‌شوند. اکثر آلیاژهای ریخته از نوع چند بلوری (PC) [۱] با دانه‌های هم محور و بعضی دیگر از نوع انجماد جهت‌دار یافته (DS) [۲] هستند. ریخته‌های چند بلوری دارای دانه‌هایی هستند که اندازه آنها از یک قطعه به قطعه دیگر تغییر می‌کند. دانه‌های یک ریخته انجماد جهت‌دار یافته، با یکدیگر موازی هستند (عمدتاً به موازات محور طولی پره) و تحت عنوان قطعات انجماد جهت‌دار یافته دانه ستونی (CGDS) [۳] شناخته می‌شوند. ممکن است یک ریخته انجماد جهت‌دار یافته فقط دارای یک بلور با محور موازی با محور طولی پره‌های توربین باشد، در این صورت به آن تک بلور انجماد جهت‌دار یافته (SCDS) [۴] گفته می‌شود. آلیاژهای ریخته نسبت به آلیاژهای کار شده استحکام بیشتری در دمای بالا دارند.

ریخته‌های چند بلوری دانه درشت، نسبت به قطعات آهنگری شده دانه‌ریز استحکام بهتری در دماهای بالا دارند. ترکیب شیمیایی آلیاژ ریخته به نحو موثری تعیین کننده استحکام دما بالای آن است. در فرآیند آهنگری ترکیب شیمیایی آلیاژ نقش چندانی در تعیین قابلیت آهنگری ندارد. سوپر آلیاژهای پایه نیکل ریخته دارای بالاترین استحکام گسیختگی خزش در دماهای بالا هستند، به همین خاطر از آنها برای کار در پره‌های هوا توربین گاز تحت شرایط دمای بالا و تنش زیاد استفاده می‌شود. در طرف مقابل قطعات آهنگری دانه‌ریز، استحکام تسلیم بالاتر و استحکام خستگی کم دامنه (LCF) [۵] بهتری در دماهای متوسط دارند، و به همین دلیل از آنها در ساخت دیسک‌های آهنگری شده استفاده می‌شود.

۲-۵- خواص سوپر آلیاژها

۲-۵-۱- کلیات

استحکام‌دهی سوپر آلیاژها توسط سخت کاری محلولی (تداخل اتم‌های جانشینی همراه با تغییر شکل)، کار سختی (انرژی نهان ناشی از تغییر شکل) و رسوب سختی (تداخل رسوب‌ها همراه با تغییر شکل) افزایش می‌یابد. هم چنین ایجاد کاربیدها (توزیع مناسب از تداخل فازهای ثانویه به همراه تغییر شکل) به ویژه در سوپر آلیاژهای پایه کبالت افزایش استحکام را در پی دارد. استحکام یک عبارت نسبی است و توسط نوع آن تعریف می‌شود. بعضی از کاربردها به استحکام تسلیم و بعضی به استحکام نهایی نیاز دارند (خواص کوتاه مدت). در بعضی دیگر از کاربردها استحکام گسیختگی خزش اهمیت دارد (خواص بلند مدت). استحکام گسیختگی خزش سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل در دماهای بالاتر از 650°C به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سوپر آلیاژهای پایه کبالت پائین تر است.

۲-۵-۲- سوپر آلیاژهای پیشرفته

سوپر آلیاژهای پایه آهن- نیکل قدیمی مانند آلیاژ ۶-۲۵-۱۶ دارای ۱۶٪ کروم، ۲۵٪ نیکل و ۶٪ مولیبدن بودند. اولین سوپر آلیاژهای نیکل شامل Nimonic و Inconel از نوع استحکام یافته با محلول جامد

بودند. در سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل بعدی مقادیر کمی (۲-۳Al درصد) و Ti افزوده شده تا در اثر رسوب فاز استحکام در دمای بالا افزایش یابد. بعداً مقدار Al در این سوپر آلیاژها تا ۶ درصد افزایش یافت و به دلیل بیشتر شدن نسبت حجمی فاز در زمینه سختی دمای بالای آلیاژ افزایش یافت. سوپرآلیاژهای پایه نیکل ریخته بیشترین مقایر عناصر سخت کننده را دارند، و تعدادی از قطعات به روش‌های CGDS و SCDS از آنها ساخته شده‌اند.

تعدادی از سوپرآلیاژهای دارای عناصر سخت کننده بیشتر (بیش از ۴۰ درصد) به روش متالورژی پودر و کار شده تولید می‌شوند. سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل با تقریباً ۲۰٪، به حداکثر استحکام خود می‌رسند، و از این نظر نمی‌توانند با سوپرآلیاژهای پایه نیکل کار شده در محدوده دمایی متوسط رقابت کنند. حتی آلیاژهایی با تقریباً ۴۰٪ (مانند آلیاژ Astroloy) کارایی دراز مدتی در حد بالایی محدوده دمایی متوسط ندارند. امروزه از آلیاژهای متالورژی پودر (P/M) با بالا (تقریباً ۵۰٪) برای کار در حد بالایی محدوده دمایی متوسط استفاده می‌شود، و آلیاژهای کار شده از طراحی‌ها حذف شده‌اند.

سوپرآلیاژهای پایه کبالت ریخته چند بلوری، دمای ذوب بالاتری نسبت به سوپرآلیاژهای پایه نیکل دارند، و به همین خاطر استحکام آنها در دماهای بالاتر از 1093°C بیشتر است. اما واقعیت این است که سوپرآلیاژهای پایه نیکل (SCDS) توانایی کار در دماهای بالاتر از 1093°C را دارند، و در بعضی موارد جایگزین آلیاژهای پایه کبالت شده‌اند. آلیاژهای پایه کبالت ریخته با شبکه بلوری مکعبی با سطح مرکزدار (آستنیتی FCC)، زمینه محلول جامد و دارای کاربیدهای پیچیده، دارای سابقه موفقیت در استفاده در پره‌های هواشکن توربین گاز (اکثراً به صورت پره‌های هواشکن و گاهی به صورت تیغه‌های توربین) هستند. آلیاژهای پایه کبالت کار شده کاربردهایی در محفظه‌های احتراق توربین گاز پیدا کرده‌اند.

۲-۵-۳- خواص مکانیکی و کاربرد سوپرآلیاژها

استحکام تابعی از زمان است و مدت زمان قرارگیری قطعه در سرویس و دمای آن از عوامل موثر بر انتخاب یک سوپرآلیاژ ویژه هستند. نرخ افت بعضی از آلیاژها در مقایسه با آلیاژهای دیگر کمتر است. به عنوان مثال اگر چه خواص مکانیکی و کاربرد سوپرآلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته با فاز اکسید توزیع شده (ODS) [۶] دارای استحکامی پایین‌تر از سوپر آلیاژهای پایه نیکل رسوب سخت شده هستند، ولی نرخ کاهش استحکام گسیختگی خزش کمتری نسبت به انواع مشابه رسوب سخت شده دارند. در نتیجه وقتی نرخ کاهش استحکام بهتر در اولویت اول، قرار داشته و استحکام اولیه نیز قابل قبول باشد، یک آلیاژ ODS به مدت طولانی‌تری می‌تواند کار کند.

در شکل ۲-۲ رفتار استحکام گسیختگی خزش یک آلیاژ ODS با سه گروه مختلف سوپر آلیاژها مقایسه شده است.

آلیاژی که عمر گسیختگی طولانی‌تری دارد، برای تولید قطعاتی که دمای کاری آنها در داخل محدوده خزش قرار دارد، ترجیح داده می‌شود. یک آلیاژ انجماد جهت‌دار یافته دانه ستونی، در شرایط خزش با کرنش پایین دارای استحکام کمتری نسبت به آلیاژ چندبلوری است.

سوپرآلیاژها انعطاف‌پذیر هستند، ولی عموماً انعطاف‌پذیری سوپرآلیاژهای پایه کبالت نسبت به سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل و پایه نیکل کمتر است. سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل در شرایط اکستروژن شده، آهنگری شده و یا نورد شده وجود دارند اما آلیاژهای پر استحکام‌تر فقط در شرایط ریخته یافت می‌شوند.

تغییر شکل گرم در فرآیند شکل دادن ارجح می‌باشد و شکل دادن سرد به تولید مقاطع نازک (ورق) محدود است. از نورد سرد می‌توان برای افزایش خواص استحکام کوتاه مدت در دماهایی پایین‌تر از 540°C می‌توان استفاده کرد.

سوپرآلیاژها دارای ضریب کشسانی در حدود 207GPa هستند. ولی ضریب کشسانی آلیاژهای ویژه بسته به نوع آلیاژ در دمای اتاق از 172GPa تا 241GPa تغییر می‌کند. تغییر ساختار آلیاژ از چند بلوری به دانه‌های ستونی بسته به جهت دانه‌ها و جهت آزمایش ضریب کشسانی را در محدوده 124GPa تا 310GPa قرار می‌دهد. حداقل ضریب کشسانی در آلیاژهای انجماد جهت‌دار یافته دیده می‌شود.

۲-۶- انتخاب سوپرآلیاژها

۲-۶-۱- کاربردهای آلیاژهای کار شده در دمای متوسط

محدوده دمایی متوسط از 540°C تا 760°C می‌باشد. اگر آلیاژی برای کار سنگین مانند، دیسک‌های توربین در نظر گرفته شده است باید دارای استحکام‌های تسلیم و کششی مناسب، انعطاف‌پذیری خوب و رفتار خستگی کم دامنه عالی، با یک سرعت رشد ترک قابل قبول، و شکل‌پذیری و قابلیت جوشکاری خوب (در محصولات ورق) باشد. قطعات سنگین مانند دیسک‌ها باید قابلیت آهنگری خوبی داشته باشند. با متالورژی پودر می‌توان قطعات آهنگری شده‌ای را که نمی‌توان به روش‌های دیگر تولید کرد، به دست آورد. قابلیت بازرسی قطعه نهایی اهمیت زیادی دارد. هزینه متغیر بسیار مهمی است، اما با تولید قطعه مناسب قابل جبران است. علاوه بر این، با استفاده از متالورژی پودر می‌توان هزینه‌ها را کاهش داد.

برای انتخاب سوپرآلیاژها برای کار در محدوده دمایی متوسط آلیاژهایی مانند Waspaloy و آلیاژهای مشابه وجود دارند، که می‌توان آنها را به روش‌های معمول آهنگری تولید نموده و استفاده کرد.

۲-۶-۲- کاربردهای آلیاژهای ریخته در دمای بالا

محدوده دماهای بالا را می‌توان از دمای 816°C تا دمای ذوب فلز در نظر گرفت. پره‌های هوای توربین در این دماها کار می‌کنند. آلیاژی که در پره‌های هوای توربین استفاده می‌شود باید دارای استحکام گسیختگی خزش و استحکام خزش بالایی باشد. برای به حداکثر رساندن استحکام گسیختگی خزش از آلیاژهای نوع

SCDS در نواحی پر فشار توربین استفاده می‌شود. علاوه بر افزایش استحکام گسیختگی خزش به دلیل جهت‌گیری ویژه محور طولی دانه، به موازات محور پره هوا، ضریب کشسانی کاهش یافته و استحکام خستگی حرارتی مکانیکی (TMF) [۷] بهینه‌ای به دست می‌آید. آلیاژی که برای بدترین شرایط کاری پره هوای توربین در نظر گرفته می‌شود باید در دمای کاری مربوطه (تقریباً 760°C) دارای دمای ذوب بالا، مقاومت اکسیداسیون خوب، استحکام خستگی حرارتی مکانیکی و گسیختگی خزشی بالا، قابلیت پوشش‌دهی عالی و استحکام خستگی کم دامنه خوب باشد.

با فرآیند تک بلور انجماد جهت‌دار یافته، از بهینه بودن خواص مکانیکی در مقاطع نازک اطمینان حاصل می‌شود. در یک بارگذاری ثابت، با کاهش ضخامت مقطع، گسیختگی سوپر آلیاژ نسبت به آزمایش انجام شده بر روی یک نمونه با ضخامت استاندارد در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. شدت کاهش خواص مکانیکی در اثر ضخامت به ساختار میکروسکوپی قطعه بستگی دارد و می‌توان این چنین درجه بندی کرد: $\text{PC} = \text{حداکثر}$ ، $\text{CGDS} = \text{کمتر}$ و $\text{SCDS} = \text{حداقل}$.

در پره‌های هوای توربین، در جایی که بار گریز از مرکز وجود نداشته باشد می‌توان از آلیاژهای پایه کبالت، دارای ساختار چند بلوری هم محور به جای آلیاژهای پایه نیکل با ساختار انجماد جهت‌دار یافته استفاده کرد، در پره‌های هوای ناحیه اول دمای ذوب موضعی بالاتر مناسب است. در بعضی از کاربردها از آلیاژ ODS در ساخت پره‌های هوا استفاده شده است. آلیاژ 754MA با اکسید ایتریا توزیع شده در زمینه مقاوم به خوردگی نیکل-کروم، استحکام گسیختگی خزش افزایش یافته‌ای دارد. آلیاژهای استحکام یافته، با فاز اکسید توزیع شده کاربرد عمومی ندارند. آلیاژ 600MA مثال دیگری است که می‌تواند دارای استحکام کافی برای به کارگیری در تیغه‌های پرفشار توربین‌های گاز هواپیما باشد. مشکل دیگر پره‌های هوای از نوع چند بلوری هم محور این است که به خاطر ضریب کشسانی بالاتر این ساختار، تنش‌های حرارتی-مکانیکی وارد شده به آن بیش از مقادیر مربوط به ساختارهای SCDS و CGDS است. ضریب کشسانی قطعات SCDS و CGDS آلیاژهای پایه نیکل ریخته. تقریباً ۶۰ درصد ضریب کشسانی قطعات PC می‌باشد. در اکثر شرایط مشکلات خستگی حرارتی مکانیکی [۸] باید با استفاده از آلیاژی با ساختار انجماد جهت‌دار یافته به حداقل رسانده شود. آلیاژهای پره هوای کم فشار توربین از آلیاژهایی مانند (Rene ۴۱)-IN-۱۰۰ یا آلیاژهای IN-۷۹۲ و Rene ۸۰ چند بلوری هم محور که قبلاً برای پره‌های هوای پرفشار استفاده شده‌اند، انتخاب می‌گردند. اگر دما یا شرایط تنش به مقدار کافی مناسب باشند، آلیاژهای IN-۷۱۳ یا U-۷۰۰ پیشنهاد می‌شوند.

۳-۱- گروه‌ها، ساختارهای بلوری و فازها

۳-۱-۱- گروه‌های سوپرآلیاژها

همانطور که قبلاً گفته شد سه گروه سوپرآلیاژ وجود دارد (پایه آهن- نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت) که هر کدام از نظر میکروسکوپی به دو نوع ریخته و کار شده (شامل آلیاژهای متالورژی پودر) تقسیم می‌شوند. علاوه بر ساختار میکروسکوپی (درشت ساختار)، ساختار بلوری (در مقیاس اتمی) و ریز ساختار (در مقیاس میکروسکوپی) نیز وجود دارد. فلزات تمایل دارند که ساختار بلوری ساده‌ای داشته باشند.

۳-۱-۲- ساختار بلوری

اگر گوی‌های کروی سخت، که برای نشان دادن ساختار بلوری فلزات به کار می‌روند، کنار هم چیده شوند، دیده می‌شود که موقعیت‌های اتمی محدودی برای قرارگیری آنها در کنار یکدیگر وجود دارد. شبکه مکعبی با سطوح مرکز دار (FCC)، مکعبی مرکز دار (BCC) و هگزاگونال فشرده (HCP) در بر گیرنده ساختار بلوری اکثر آلیاژها هستند. اگر شبکه تتراگونال (BCT) به این فهرست اضافه شود، ساختار سوپرآلیاژها به استثناء فازهای پیچیده‌ای مانند و به سهولت نشان داده خواهد شد. البته نیازی به توضیح همه فازها نیست. هنگامی که در یک سیستم بیش از یک عضو وجود داشته باشد (مانند آنچه که در یک آلیاژ وجود دارد)، یک ساختار تشکیل می‌شود. بدین معنی که برای عنصر اضافه شده موقعیت‌های بلوری ویژه‌ای باید وجود داشته باشد. به عنوان مثال فاز ثانویه‌ای مانند Al_3Ni دارای ساختار بلوری FCC است که در آن اتم‌های Ni در مرکز سطوح و اتم‌های Al در گوشه‌ها قرار می‌گیرند.

۳-۱-۳- فاز در سوپرآلیاژها

سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل دارای فاز با شبکه FCC آستنیتی و فازهای ثانویه مختلفی هستند. سایر فازهای ثانویه کنترل کننده خواص دیگر این سوپرآلیاژها عبارتند از: کاربیدهای FCC از نوع MC_{23} , $M_6M_{23}C_7M$ و فاز با ساختار بلوری FCC و ترکیب $(Ti,Al)_3Ni$ فاز با ساختار بلوری BCT و ترکیب Ni_3Nb ، فاز با ساختار بلوری هگزاگونال و ترکیب Ti_3Ni و فاز بین فلزی با ساختمان بلوری اورتورمبیک و ترکیب Nb_3Ni .

ساختمان بلوری فازهای و از نوع فشرده (gcp) [۹] است. تولید و کنترل فازهای گوناگون در سوپرآلیاژها، ویژگی‌های منحصر به فردی را در آنها به وجود می‌آورد. سوپرآلیاژها استحکام خود را توسط سخت کننده‌های محلول جامد و فازهای رسوبی بدست می‌آورند. فازهای رسوبی استحکام دهنده اصلی و هستند، که در سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل یافت می‌شوند.

کاربیدها به طور مستقیم (مانند آلیاژهای سخت شده با محلول جامد) به مقدار محدود و یا به طور غیر مستقیم (با تقویت مرز دانه‌ها و جلوگیری از حرکت برشی) استحکام را بهبود می‌بخشند. کاربیدها در هر سه

گروه از سوپرآلیاژها یافت می‌شوند. فازهای و در طی فرآیند تولید از نظر کنترل ساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل کار شده مفید هستند. میزان مشارکت مستقیم کاربیدها در بهبود استحکام به نوع آلیاژ و فرآیند بستگی دارد. علاوه بر عناصری که سخت کننده محلول جامد، کاربیدزا و تشکیل دهنده فاز هستند، عناصر دیگری مانند B، Zr و Hf برای افزایش خواص مکانیکی یا شیمیایی سوپرآلیاژها افزوده می‌شوند. این عناصر جزئی در سوپر آلیاژهای پایه کبالت یافت نمی‌شوند. بعضی از عناصر کاربیدزا و تشکیل دهنده فاز ممکن است به نحو موثری در خواص شیمیایی مشارکت کنند. ترکیبات بور (بوریدها) ممکن است در سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل تشکیل شوند.

فازهای مضر نیز در سوپرآلیاژها تشکیل می‌شوند. در بین این فازها می‌توان از فازهای و Laves نام برد. این فازها دارای ساختار بلوری فشرده از نوع TCP هستند و در صورت جزئی بودن مورد مطالعه قرار نمی‌گیرند، ولی اگر مقدار آنها افزایش یابد بسیار مضر هستند. در جدول ۳-۱ اطلاعات مربوط به فازهای شناخته شده در سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل نشان داده شده است.

۳-۲- مقدمه‌ای بر گروه‌های آلیاژی

۳-۲-۱- سوپر آلیاژهای پایه آهن- نیکل

مهم‌ترین آلیاژهای گروه سوپرآلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای استحکام یافته با رسوب ترکیبات بین فلزی در زمینه FCC استنیتی هستند.

عمومی‌ترین رسوب، فاز است، که در آلیاژهای Incoloy ۹۰۱، ۵۷۷- یا ۲۸۶A دیده می‌شود. بعضی از آلیاژها مانند IN-۷۱۸ [۱۰] که دارای فازهای رسوبی و هستند، در گذشته جزو گروه پایه آهن- نیکل بودند ولی اکنون در گروه سوپر آلیاژهای پایه نیکل قرار گرفته‌اند. استحکام سوپرآلیاژهای دیگر پایه آهن- نیکل شامل فولادهای زنگ نزن اصلاح شده در ابتدا با محلول جامد استحکام می‌یافتند. این دسته از سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل از آلیاژ ۹DL-۱۹ (فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ با کروم و نیکل اصلاح شده، کربن بیشتر و دارای عناصر سخت کننده محلول جامد) تا آلیاژ H۸۰۰-Incoloy (۲۱٪ کرم)، نیکل بالا و کمی Al و Ti (برای تشکیل فاز) تغییر می‌کنند. در حال حاضر سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل به صورت کار شده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۲-۲- سوپر آلیاژهای پایه نیکل

اگر چه سوپرآلیاژهای پایه نیکل سخت شده، با محلول جامد هستند ولی مهم‌ترین آلیاژهای این گروه، دارای رسوب ترکیبات بین فلزی در زمینه FCC هستند. در آلیاژهای حاوی Ti و Al استحکام با رسوب فاز بهبود پیدا می‌کند. آلیاژهای کار شده مانند Waspaloy، U۷۲۰، -U۷۰۰، Astroloy و آلیاژهای ریخته مانند IN-۷۱۳، Rene ۸۰، MAR-M-۲۰۰، Rene ۸۰ از این قبیل هستند. در سوپرآلیاژهای پایه نیکل کبالت‌دار، استحکام با رسوب فاز بهبود می‌یابد. IN-۷۱۸ از آلیاژهای سخت شده با رسوب

فاز می‌باشد. بعضی از آلیاژهای پایه نیکل دارای Al, Ti, Nd بوده، و هر دو در بهبود استحکام از رسوب و بهره می‌برند. آلیاژهای ۷۰۶IN-، ۹۰۹IN- گاهی در فهرست سوپرآلیاژها پایه آهن- نیکل آورده می‌شوند.

در بین سوپرآلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته با محلول جامد آلیاژی‌هایی مانند Hastelloy و ۶۲۷IN- قرار دارند. آلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته با توزیع فاز اکسید (ODS)، مانند آلیاژ ۶۵۴IN-MA و ۶۰۰IN-MA هستند، که استحکام آنها با توزیع ذرات خنثی مانند ایتربا و در بعضی موارد با رسوب فاز افزایش می‌یابد. سوپرآلیاژهای پایه نیکل به هر دو شکل ریخته و کار شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرآیندهای ویژه دیگری (متالورژی پودر/ آهنگری همدم) نیز برای تولید انواع ترکیبات سوپرآلیاژ کار شده آنها مانند ۹۰۰IN- Rene و Astroloy مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یک بعد اضافی در سوپرآلیاژهای پایه نیکل کنترل مورفولوژی (نسبت جوانب و جهت‌گیری دانه‌ها) به عنوان وسیله‌ای برای بهبود خواص است. در بعضی موارد مرز دانه‌ها حذف شده‌اند. در آلیاژهای متالورژی پودر کار شده نوع ODS و آلیاژهای ریخته مانند ۲۴۷MAR-M با کنترل مورفولوژی توسط تبلور مجدد جهت‌دار و یا انجماد جهت‌دار خواص آلیاژ بهبود یافته است.

۳-۲-۳- سوپرآلیاژهای پایه کبالت

استحکام سوپرآلیاژهای پایه کبالت. توسط کاربیدها و سخت‌کننده‌های محلول جامد بهبود می‌یابد. در این آلیاژها فرق اساسی بین ساختارهای ریخته و کار شده وجود دارد. یک نمونه از آلیاژهای ریخته ۴۰X- و یک نمونه از آلیاژهای کار شده ۶۰۵- (L۲۵HA-) هستند. ترکیبات بین فلزی مانند رسوب‌های که در سوپرآلیاژهای پایه نیکل یا پایه آهن- نیکل در محدوده وسیعی وجود دارند در آلیاژهای پایه کبالت یافت نمی‌شوند.

۳-۳- عناصر آلیاژی و اثرات آنها بر ریزساختار سوپرآلیاژها

۳-۳-۱- تنوع خواص سوپرآلیاژها (در یک ترکیب شیمیایی مشخص) معمولاً با ترکیب شرایط محصول (ریخته یا کار شده) و عملیات حرارتی پس از آن گسترش می‌یابد. ترکیب شیمیایی آلیاژ در رسیدن به یک سطح استحکام و مقاومت خوردگی بسیار اهمیت دارد، ولی فرآیند تولید نقش اساسی در رسیدن به خواص بهینه سوپرآلیاژ دارد. ساختار بلوری در طی فرآیند تولید ایجاد می‌شود. تغییرات ریز ساختار با انحلال تمام یا بخشی از کاربیدها و فازهای رسوبی بین فلزی (مانند و) و سپس توزیع مجدد آنها در یک شکل مناسب دیگر ایجاد می‌شود. اندازه دانه در آلیاژهای ریخته تابع مستقیمی از فرآیند ریخته‌گری است. اندازه دانه آلیاژهای کار شده در محدوده گسترده‌تری تغییر می‌یابد. اندازه دانه آلیاژهای کار شده نسبت به آلیاژهای ریخته کوچک‌تر است. ریزساختار نه تنها شامل اندازه دانه و مورفولوژی بلکه شامل نوع و توزیع فازهای ثانویه در زمینه آستنیتی سوپرآلیاژ است.

۳-۳-۲- عناصر اصلی در سوپرآلیاژها

تعدادی از عناصر به صورت محلول جامد در می‌آیند تا یک یا چند مورد از خواص زیر را بهبود بخشند: استحکام توسط Mo, Ta, W, Re مقاومت خوردگی توسط Al, Cr ، مقاومت خوردگی دما بالا توسط Ti ، پایداری فاز توسط Ni ، افزایش نسبت حجمی V_f و رسوب‌های ثانویه مفید توسط Co بهبود می‌یابند. عناصر دیگری (Ti, Al) و (Nb) برای تشکیل رسوب‌های سخت‌کننده مانند و به ترکیب شیمیایی افزوده می‌شوند. در سالهای اخیر یکی از عناصر اصلی اضافه شده به ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژهای پایه نیکل، عنصر رنیم (Re) بوده است، که در آلیاژهای ریخته‌محدوده دمای فرآیند دانه‌های ستونی انجماد جهت‌دار یافته ($CGDS$) و تک بلور انجماد جهت‌دار یافته ($SCDS$) را افزایش می‌دهد. رنیم به واسطه کاهش سرعت رشد رسوب این بهبود را به وجود می‌آورد.

۳-۳-۳- عناصر جزئی مفید در سوپرآلیاژها

عناصر جزئی (C, B) برای تشکیل کاربید و بورید اضافه می‌شوند. تعدادی از عناصر (Hf, Zr, B) نیز برای آماده‌سازی مرز دانه‌ها، برای تشکیل رسوب‌ها یا کاربیدها افزوده می‌شوند. برای بهبود مقاومت خوردگی در بعضی از آلیاژها عنصر لانتانیم اضافه شده است. افزودن ایتريم (Y) [۱۱] برای افزایش عمر پوشش آلیاژ انجام می‌شود.

۳-۳-۴- عناصر تشکیل دهنده فازهای ترد

بعضی عناصر (Cr, W, Mo, Re, Co و ...) گرچه برای ایجاد کیفیت مطلوب‌تر آلیاژها اضافه می‌شوند، ولی در بوجود آوردن بعضی از فازهای نامطلوب مشارکت می‌کنند. فاز tep [۱۲] معمولاً ترد و دارای انعطاف‌پذیری کم است و در صورتی که این تردی بیش از حد معمول باشد، باعث کاهش خواص مکانیکی (بعضی مواقع خوردگی) می‌شود.

۳-۳-۵- عناصر ناخواسته و مضر در سوپرآلیاژها

عناصری نظیر $Ag, Se, Te, Bi, Pb, S, P, Si$ حتی در مقادیر بسیار کم، به اندازه قسمت در میلیون (PPM)، اغلب در افت خواص سوپرآلیاژها مشارکت می‌کنند اما آنها با میکروسکوپ‌های نوری یا الکترونی دیده نمی‌شوند. با آنالیزهای اسپکتروسکوپی و الکترونی نشان داده شده است، که مرز دانه‌ها در اثر حضور عناصر مضر تغییر می‌کند. عنصر Mg در اثر ترکیب با گوگرد اثرات ناخواسته آن را حذف می‌کند. Ti با نیتروژن ترکیب شده و TiN را تشکیل می‌دهد. در بعضی از موارد این ترکیبات و نظایر آن در ریز ساختار قابل مشاهده هستند.

۳-۳-۶- عناصر ایجاد کننده مقاومت خوردگی و اکسیداسیون

همه سوپرآلیاژها دارای کروم و عناصر دیگری برای بهبود مقاومت در برابر خسارت محیطی هستند. کروم در سطح خارجی آلیاژ Cr_2O_3 را تشکیل می‌دهد. اگر آلومینیوم به حد کافی وجود داشته باشد لایه اکسیدی

Al_2O_3 نیز تشکیل می‌شود و حفاظت بیشتری در مقابل اکسیداسیون انجام می‌دهد. مقدار کروم در سوپرآلیاژهای پایه نیکل ۶ تا ۲۲ درصد، در سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل ۱۵ تا ۲۵ درصد و در سوپرآلیاژهای پایه کبالت ۲۰ تا ۳۰ درصد است. در سوپرآلیاژهای پایه نیکل ممکن است، بیش از ۶ درصد آلومینیوم وجود داشته باشد. کروم عنصر اصلی در مقاومت خوردگی داغ است ولی ممکن است تیتانیوم و عناصر دیگری نیز مکمل اثرات کروم باشند.

۳-۴- استحكام دهی سوپرآلیاژها

۳-۴-۱- رسوب‌ها و استحكام

رسوب‌ها به خاطر کند کردن فرآیند تغییر شکل که در اثر بارگذاری اتفاق می‌افتد استحكام آلیاژ را افزایش می‌دهند. بعضی از ویژگیهای رسوب‌های سخت کننده که مانع تغییر شکل می‌شوند عبارتند از:

- درجه عدم انطباق بین رسوب و زمینه: بهترین حالت این است که رسوب و زمینه دارای ساختار بلوری و پارامتر شبکه یکسان باشند. در این صورت رسوب بیشتری در زمینه حل می‌شود. درجه عدم انطباق در سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل در محدوده درصد قرار دارد.

- رسوب منظم: قرار گرفتن اتم‌ها در موقعیت‌های مرجح انرژی لازم برای عبور عوامل تغییر شکل (ناجایی‌ها) از میان رسوب را افزایش می‌دهد. رسوب‌های منظم انرژی بالاتری از رسوب‌های نامنظم دارند.

- اندازه رسوب: وقتی که اندازه رسوب خیلی کوچک باشد، ناجایی‌ها به راحتی می‌توانند از آنها عبور کنند. اگر اندازه رسوب خیلی بزرگ باشد، ناجایی‌ها به هنگام عبور از آنها خم می‌شوند و امکان دارد استحكام کمتر از مقدار بهینه باشد. مقدار بهینه تابعی سات از ویژگی اندازه‌گیری شده. در خزش یک تک بلور خیلی مطلوب‌تر است، ولی باید توجه داشت که تک بلور با فرآیندهای ویژه SCDS, CGDS سوپرآلیاژهای پایه نیکل بدست می‌آید. در سوپرآلیاژهای کار شده دو نوع اندازه رسوب مطلوب است زیرا حساسیت به ترک را کاهش می‌دهد. رسوب‌های هم اندازه که در عملیات حرارتی پیر کردن در دمای پایین بدست می‌آید باعث افزایش استحكام کششی و کاهش مقاومت خزش می‌شود. در سوپرآلیاژها فاز رسوبی اصلی است. این رسوب یک فاز با ساختار بلوری FCC بین فلزی منظم با ترکیب شیمیایی $(\text{Ti,Al})_3\text{Ni}$ است.

عناصر آلیاژی بر درجه عدم انطباق رسوب با زمینه اثر می‌گذارند. یک فاز هگزگونال منظم با ترکیب شیمیایی Ti_3Ni است که شکل ناپایدار غنی از Ti است. انواع دیگر فازهای بین فلزی مانند رسوب‌های فاز اورتورمبیک با ترکیب Nb_3Ni یا با شبکه و ترکیب Nb_3Ni نیز وجود دارند که استحكام سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل را به نحو قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند.

۳-۴-۲- فاز

ترکیب بین فلزی با ترکیب اسمی $Nb_{70}Ni$ است که Ti و عناصر حل شونده دیگری نیز در خود دارد. این فاز در محدوده ترکیب شیمیایی نسبتاً کوچکی پایدار است، اما خواص قابل توجهی دارد که آن را قادر می‌سازد تا استحکام دما بالا در سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل را بهبود دهد. در آلیاژهای ریخته ترکیب یوتکتیک - تشکیل خواهد گردید که ممکن است پس از عملیات حرارتی نیز باقی بماند. در مجموع در طی عملیات حرارتی یا کار، فاز در مرز دانه‌ها و در اطراف ذرات کاربیدهای $M_{23}C_6$ یا MC تشکیل می‌گردد.

۳-۴-۳- فاز

یک رسوب منظم با ترکیب شیمیایی $Nb_{70}Ni$ است و در سوپرآلیاژهای پایه نیکل (یا پایه آهن- نیکل) مانند آلیاژهای $70\%IN-$ و $71\%IN-$ رسوب می‌کند. در غیاب آهن یا در دماها و زمان‌های ویژه فاز نیز با همان ترکیب شیمیایی $Nb_{70}Ni$ تشکیل می‌شود. فاز غیر منظم است و وقتی که مقدار آن زیاد باشد، استحکام را افزایش نمی‌دهد. مقادیر کم رسوب برای کنترل و ریز کردن اندازه دانه و در نتیجه افزایش خواص کششی. مقاومت خستگی و خزش آلیاژ به کار می‌رود. برای اطمینان از رسوب به جای، به عملیات حرارتی دقیقی نیاز است. در آلیاژ $71\%IN-$ فاز اغلب به همراه فاز رسوب می‌کند، اما تحت بعضی شرایط رسوب فاز اصلی استحکام دهنده در آلیاژ است.

۳-۴-۴- کاربیدها

کاربیدها نیز از ترکیبات بسیار مهم در سوپرآلیاژها هستند. کاربیدها به مخصوصاً در آلیاژهای ریخته چند بلوری بواسطه رسوب در مرز دانه‌ها استحکام و انعطاف پذیری مطلوبی ایجاد می‌کنند. مقدار کاربید در آلیاژهای کار شده اغلب کمتر از آلیاژهای ریخته است. با افزایش درجه تمیزی سوپرآلیاژها مقدار کاربید در آلیاژهای کار شده کاهش یافته است.

حداقل انواع درشت کاربیدها یکی از عوامل محدود کننده در مکانیک شکست در کاربردهای پیشرفته سوپرآلیاژها کار شده می‌باشند.

کاربیدها می‌توانند در استحکام زمینه، به ویژه در سوپرآلیاژهای پایه کبالت، و کنترل اندازه دانه در بعضی از آلیاژهای کار شده موثر باشند. عملیات حرارتی بر روی تعدادی از کاربیدها اثر ندارد، در حالی که بر روی بعضی دیگر چنین نیست. تنوع کاربیدها در یک آلیاژ به ترکیب شیمیایی و فرآیند بستگی دارد. همانطور که قبلاً گفته شد انواع مهم کاربیدها عبارتند از: $M_{23}C_6$ ، MC ، M_6C و M_7C_3 که در آن M یک یا چند عنصر فلزی است. اکثر کاربیدها به صورت ترکیبی هستند و معمولاً در اثر واکنش‌های حالت جامد پس از تجزیه کاربید MC که در حالت مذاب شکل می‌گیرد، به وجود می‌آیند. از نظر دمای تشکیل، کاربید MC یک کاربید دما بالا و کاربیدهای $M_{23}C_6$ و M_7C_3 از نوع دما پایین هستند. کاربید M_6C نیز در دماهای

متوسط تشکیل می‌گردد. کاربیدهای MC در مذاب در اثر واکنش یا رسوب از محلول جامد فوق اشباع در دماهای بالاتر از 1038°C تشکیل می‌شوند. کاربیدهای C_6M عموماً در دمای بین 816°C تا 982°C و شاید تا 1038°C تشکیل می‌شوند. کاربیدهای مطلوب C_{23}M در دمای 790 تا 816°C تشکیل می‌شوند. کاربیدهای موجود در سوپرآلیاژها سه نوع هستند. اول کاربیدهای مرز دانه‌ای که اگر به نحو صحیحی تشکیل شده باشند، مرز دانه را استحکام بخشیده و از حرکت آن جلوگیری نموده و به آزاد شدن تنش کمک می‌کنند. دوم کاربیدهای ریز رسوب کرده در زمینه که استحکام را افزایش می‌دهند. سوم کاربیدهایی که عناصر ناپایدار کننده فازها در حین کار را حذف می‌کنند.

کاربید C_6M دارای ساختار بلوری FCC است که معمولاً در طی سرد شدن سوپرآلیاژ تشکیل می‌شود. این کاربیدها به صورت ناهمگن در داخل و خارج از دانه‌ها و اغلب در میان ستون‌ها توزیع می‌شوند. کاربیدها منبع اصلی دگرگونی فاز بعدی در طی فرآیند عملیات حرارتی است. کاربیدهای MC مانند HfC ، TiC از پایدارترین کاربیدهای موجود در طبیعت هستند.

کاربیدهای ارجح از نظر تشکیل در سوپرآلیاژها، HfC ، TaC ، NbC و TiC هستند. در این کابیدها اتم M می‌تواند از چند عنصر فلزی مانند $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$ تشکیل شده باشد. عناصر با فعالیت کم مانند Mo ، W نیز می‌توانند در این کاربیدها حضور داشته باشند، برای مثال کاربید $(\text{Ti}, \text{Mo})\text{C}$ که در آلیاژهای M- 252 ، 77Rene و $U-500$ تشکیل می‌شوند.

آلیاژهای جدید دارای نیوبیوم و تانتالیوم زیاد، دارای کاربیدهای MC هستند، که به راحتی در طی فرآیند یا عملیات حرارتی انحلالی، در محدوده دمایی 1260°C – 1200°C تجزیه نمی‌شوند. کاربیدهای C_{23}M مانند C_{23}Cr در آلیاژی با کروم متوسط تا زیاد به سرعت تشکیل می‌شوند. کاربیدهای C_{23}M گاهی در امتداد مرز دوقلوها و محل‌های دارای نقص در چیده شدن، دیده می‌شوند. کاربیدهای C_6M شبکه مکعبی پیچیده‌ای دارند. این کاربیدها وقتی که مقدار Mo ، یا W در ترکیب شیمیایی بین 6 تا 8 درصد باشد، در دمایی واقع در محدوده 815°C تا 980°C تشکیل می‌شوند. کاربید C_6M به همراه کاربید C_{23}M ، در آلیاژهای 80Rene ، 41Rene ، 1753AF وجود دارد. به دلیل پایداری بیشتر کاربیدهای C_6M در دماهای بالاتر نسبت به کاربیدهای C_{23}M به عنوان یک رسوب مرز دانه‌ای و کنترل کننده اندازه دانه در طی فرآیند آلیاژهای کار شده اهمیت بیشتری دارد.

۳-۴-۵- کاربیدهای C_7M

کاربیدهای C_7M به طور گسترده‌ای در سوپرآلیاژها مشاهده نشده‌اند ولی در بعضی از آلیاژهای پایه کبالت و سوپرآلیاژ پایه نیکل- کروم و 80Nimonic A در دمای بیش از 1000°C وجود دارند. افزودن عناصری مانند Mo ، W ، Nb و Co به آلیاژهای پایه نیکل از تشکیل C_7M در آنها جلوگیری می‌کند. توده کاربید C_7Cr در آلیاژ 80Nimonic A پس از حرارت دادن آن در دمای 1080°C در مرز دانه‌ها تشکیل

می‌شود. در عملیات حرارتی پیر کردن بعدی برای رسوب فاز، تشکیل کاربید $\epsilon\text{-C}_{23}\text{M}$ به خاطر وجود کاربید $\gamma\text{-C}_7\text{Cr}$ با شکل مکعبی در مرز دانه‌ها به تعویق می‌افتد.

۳-۴-۶- بوریدها و عناصر جزئی مفید دیگر (به جز کربن)

اضافه کردن مقادیر کمی از عناصر جزئی به ویژه Zr و B در بهبود مقاومت خزش سوپراآلیاژها موثر است. اگر چه اطلاعات محدودی از ترکیب M_xZr_y وجود دارد، ولی معلوم شده است که بوریدها در سوپراآلیاژهای پایه نیکل و احتمالاً در آلیاژهای پایه آهن- نیکل تشکیل می‌شوند. بوریدها ذرات سخت هستند و به شکل مکعبی تا شبه کروی در مرز دانه‌ها دیده می‌شوند. بوریدها عمدتاً به شکل $\gamma\text{-B}_3\text{M}$ با شبکه بلوری تتراگونال یافت می‌شوند. بورید $\gamma\text{-MB}$ نیز شناخته شده اما بررسی‌های اندکی روی آن انجام گرفته است. هافنیم (Hf) نیز یکی دیگر از عناصر جزئی مفید است که انعطاف‌پذیری مرز دانه‌ها را بهبود می‌بخشد. منیزیم نیز با ترکیب با گوگرد که بر روی انعطاف‌پذیری آلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن- نیکل اثرات مضر دارد، مفید است.

۳-۵- تاثیر فرآیند بر بهبود ریز ساختار

۳-۵-۱- فرآیند تولید سوپراآلیاژ در واقع علم و هنر تبدیل سوپراآلیاژ به شکل نهایی آن است. فرآیند و عناصر آلیاژی به هم وابسته‌اند. تغییرات ریزساختار در نتیجه فرآیند و ترتیب انجام آن بر روی ترکیب شیمیایی بدست می‌آید. ریز ساختارها نه تنها تابعی از ترکیب شیمیایی بلکه تابعی از ذوب، کار و عملیات حرارتی هستند. بخش‌های اصلی تولید سوپراآلیاژ، فرآیندهای ذوب، تبدیل شدن به محصول ریخته یا کار شده و عملیات حرارتی هستند. عملیات حرارتی شناخته شده‌ترین مرحله فرآیند است زیرا آخرین مرحله‌ای است که در آن خواص مطلوب، به ویژه در آلیاژهای رسوب سخت شونده، بدست می‌آید.

H. Daneshmandi

۴-۱- فرآیند EAF/AOD از سال ۱۹۶۰ برای ذوب آلیاژهای آهن پر کروم زنگ نزن (دارای ۱۱/۵ درصد کروم یا بیشتر) استفاده شده است. بعضی از سوپرآلیاژها از نظر خواص همانند فولادهای زنگ نزن مخصوص هستند. سوپرآلیاژهای پایه نیکل پر کروم را می‌توان به طریق مشابه با فولادهای زنگ نزن ذوب کرد. همانند اکثر فرآیندهای ذوب ترکیب شارژر مواد اولیه ذوب، اقتصادی‌ترین بخش فرآیند را تشکیل می‌دهد. فرآیند EAF/AOD این مزیت ویژه را دارد که در آن می‌توان ارزانه‌ترین مواد خام را نسبت به فرآیندهای ذوب دیگر به کار برد. در این روش مستقیماً از قراضه استفاده می‌شود، بدون آنکه نیازی به ذوب اولیه آن باشد. همچنین در شرایط محدود شده به جای استفاده از مواد خام با ارزش مانند Mo و Nb می‌توان از اکسیدهای آنها که ارزانه‌تر هستند، استفاده کرد. در مجموع روش ذوب EAF/AOD کم هزینه‌ترین فرآیند ذوب سوپرآلیاژهاست.

۴-۱-۱- تشریح فرآیند EAF/AOD

همان گونه که از نام فرآیند بر می‌آید این روش شامل دو نوع تجهیزات است: یک کوره قوس الکتریکی (EAF) و یک تانک کربن‌زدایی با آرگن و اکسیژن بار که در کوره EAF قرار داده می‌شود. توان الکتریکی کوره قوس الکتریکی از طریق الکترودهای بزرگ گرافیتی که در سقف کوره قرار دارد، به بار منتقل می‌شود. در شروع عملیات ذوب، الکترود به داخل بار فرو می‌رود، تا جریان الکتریکی از بار عبور کرده و به کف کوره برسد. سپس الکترودها به تدریج بیرون کشیده می‌شوند تا یک قوس پایدار بین بار و الکترود برقرار شود. این قوس توان لازم برای ذوب بار را تامین می‌کند. پس از ذوب شدن بار آهک (CaO) اضافه می‌شود، تا با ایجاد سرباره، گوگرد مذاب را کاهش دهد. علاوه بر این اکسیژن با لوله‌های مخصوص با فشار در زیر سطح مذاب دمیده می‌شود. واکنش اکسیژن با کربن، سیلیسیم و آلومینیوم، این عناصر را اکسید کرده و به سرباره منتقل می‌کند و گرمای ایجاد شده از این واکنش‌های گرمازا دمای مذاب را در حد مطلوب نگه می‌دارد. حذف عناصر ناخواسته از مذاب مرحله احیاء مذاب نامیده می‌شود. ذکر این نکته در مورد فرآیند EAF ضروری است که پس از ایجاد مذاب حرارت لازم برای ادامه فرآیند توسط واکنش‌های گرمازا تامین می‌شود، نه توسط انرژی‌های خارجی. چنانچه لازم باشد، با افزودن قراضه به ذوب دمای آن را کاهش می‌دهند.

در این فرآیند مقدار زیادی سرباره در مراحل اکسیداسیون و گوگرد زدایی ایجاد می‌شود. سرباره به طور دستی از مذاب جدا شده و از طریق دریچه سرباره که بر روی کوره قرار دارد، به بیرون منتقل می‌شود. پس از سرباره‌گیری از ذوب، ترکیب شیمیایی نمونه‌گیری گرفته می‌شود. تنظیم آنالیز شیمیایی ذوب، بر مبنای آنالیز به دست آمده از این نمونه صورت می‌گیرد. برای نگه داشتن دما در سطح مطلوب در طی مدت

نمونه‌گیری و تنظیم ترکیب شیمیایی می‌توان به ذوب آلومینیوم اضافه کرد و سپس با دمش اکسیژن آن را حذف نمود.

وقتی که ترکیب شیمیایی مورد نظر بدست آمد، بار ذوب شده از طریق دریچه بار ریز جلو کوره به داخل پاتیل انتقال ذوب ریخته می‌شود. پاتیل انتقال ذوب به بخش دوم فرآیند یعنی تانک AOD منتقل می‌شود. تانک AOD دارای واحد تامین انرژی مستقلی نیست. در داخل این تانک مخلوطی از گازهای آرگن در مخلوط گازی افزایش داده می‌شود، تا درصد اکسیداسیون کاهش پیدا کند (به دلیل کاهش فشار جزئی اکسیژن). عمل دمش تا وقتی که اکسید کروم موجود در سرباره احیاء شده و کروم فلزی به مذاب منتقل شود، ادامه پیدا می‌کند، زیرا از نظر ترمودینامیکی کروم فلزی از اکسید کروم پایدارتر است. مشابه کوره قوس برای ثابت نگهداشتن دمای مذاب می‌توان از افزودن آلومینیوم و حذف آن با اکسیداسیون استفاده کرد.

وقتی که فرآیند بازیابی کروم به پایان خود نزدیک شد. اصلاحات لازم بر روی ترکیب شیمیایی نمونه انجام می‌شود. مذاب سرباره‌گیری شده و به پاتیل ریخته‌گری منتقل می‌شود. این پاتیل در کف خود دارای یک توپی است که با باز شدن آن مذاب به داخل قالب ریخته می‌شود. قالب می‌تواند به دو روش پر شود. در روش اول مذاب از سر قالب مستقیماً به درون آن ریخته می‌شود. در روش دوم مذاب در یک لوله بار ریز میانی ریخته می‌شود و از طریق این لوله مذاب از کف تعدادی از قالب‌ها به درون آن‌ها وارد می‌شود. قالب الکترودهای گرد و تختال‌های چهارگوش به طور گسترده‌ای در تولید سوپرآلیاژها استفاده می‌شوند. پس از ریخته‌گری شمش از قالب خارج شده و می‌تواند مستقیماً مورد استفاده قرار گیرد و یا بسته به ویژگیهای انجماد برای به دست آوردن ساختاری با جدایش کمتر با فرآیندهای دیگری ذوب مجدد شود.

۴-۲- عملیات کوره قوس الکتریکی / کربن زدایی با اکسیژن و آرگن (EAF/AOD)

۴-۲-۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ و آماده کردن شارژ

چند ویژگی مهم در فرآیند EAF/AOD تعیین کننده نوع سوپرآلیاژ تولید شده با این روش هستند. اول اینکه اگر محصول در شرایط AOD و ریخته استفاده می‌شود، ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ و ویژگیهای انجماد آن تعیین کننده نوع آلیاژ است. این روش ریخته‌گری عموماً به طریق استاتیکی انجام می‌شود. در نتیجه ساختار جدایش یافته حاصل باید در محصول نهایی قابل قبول باشد. بدین معنی که مقدار عنصر محصول سوپرآلیاژها باید کم باشد تا جدایش شدیدی به وجود نیاید. هم چنین سوپرآلیاژهایی را که جدایش متوسط دارند، ولی وجود آن در کاربرد نهایی سوپرآلیاژ زیان‌آور نیست، می‌توان به این روش تولید کرد.

دوم اینکه اگر محصول به مقدار گاز محلول بسیار کم یا کنترل ترکیب شیمیایی دقیق که در فرآیندهای تحت خلاء وجود دارد، نیاز نداشته باشد سوپرآلیاژ را می‌توان با فرآیند EAF/AOD ذوب نموده و به صورت الکتروده، ریخته‌گری کرد. بیشترین دلیل استفاده از فرآیند EAF/AOD به جای فرآیندهای تحت

خلاء، پایین بودن قیمت مواد اولیه شارژ و کوتاه بودن زمان ذوب است. چنانچه گفته شد، سوپرآلیاژها نوعی فولادهای زنگ نزن مخصوص هستند. فلز کروم افزودنی اصلی در اکثر سوپرآلیاژهاست. بدست آوردن کروم خالص دشوار و حذف آهن و کربن آن بسیار پرهزینه است.

توانایی فرآیند EAF/AOD در کاهش سطح کربن و بازیافت قسمت اعظمی از کروم. این فرآیند را قادر ساخته که از فروکروم پر کربن به جای فروکروم کم کربن یا کروم خالص استفاده کند (قیمت‌های سال ۲۰۰۰ این مواد به ترتیب ۰/۸۹، ۱/۳۳ و ۸/۸۹ دلار بر کیلوگرم بوده است). در طی فرآیند EAF کربن به عنوان سوخت مصرف می‌شود و به همین لحاظ لازم نیست قراضه مورد استفاده، گریس زدایی و یا با روش‌های ویژه‌ای آماده‌سازی شده باشد، زیرا آلودگی‌های کربنی در جریان فرآیند حذف می‌شوند. حذف هزینه‌های آماده‌سازی قراضه نیز به کاهش هزینه فرآیند می‌انجامد.

بازیافت قراضه از مسائل مهم صنعت سوپرآلیاژهاست. قراضه تولید شده در مرحله نورد محصول ممکن است بین ۲۵ تا ۵۰ درصد باشد. ماشین‌کاری سوپرآلیاژها برای رسیدن به شکل نهایی نیز یکی دیگر از عوامل افزایش قراضه به صورت ماشین‌کاری می‌باشد. توانایی فرآیند EAF/AOD در استفاده از این براده‌ها و حذف آلودگی‌ها بسیار ثمربخش است. در فرآیند EAF/AOD عناصری که انرژی آزاد اکسیداسیون بالایی دارند، حذف می‌شوند و به همین خاطر قراضه‌های آلیاژهای مشابه و نه دقیقاً یکسان نیز در این فرآیند قابل استفاده هستند. از طرف دیگر تولید و کنترل ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژهایی که دارای عناصری با انرژی آزاد اکسیداسیون بالا و نیز آلیاژهایی که دارای ترکیب شیمیایی بسیار محدود و یا عاری از ناخالصی هستند، با این روش دشوار است.

درست به همان ترتیبی که می‌توان مواد پر کربن را در روش EAF/AOD استفاده کرد، بعضی از مواد پر گوگرد را نیز می‌توان در این فرآیند به کار برد. حذف گوگرد از سنگ معدن هزینه بالایی دارد. مواد اولیه گوگرددار نسبت به انواع بدون گوگرد قیمت پایین‌تری دارند. در فرآیند EAF/AOD با افزودن مواد گوگردزا (مانند آهنک) به مذاب از انتقال گوگرد به سرباره اطمینان حاصل می‌شود.

۴-۲-۲- بارگذاری EAF

عموماً از برنامه‌های رایانه‌ای برای انتخاب ترکیب بار مواد اولیه استفاده می‌شود. شکل مواد اولیه و کوره قوس تعیین کننده ترکیب موادی هستند، که در آن بارگذاری خواهند شد. بار داخل ظرف کفریز ریخته می‌شود. ظرف به بالای کوره منتقل و کف آن باز شده و محتویات آن به داخل کوره ریخته می‌شود. برخورد قطعات درشت قراضه با نسوز کف کوره می‌تواند خسارات شدیدی به آن وارد کرده و عمر لایه نسوز کوره را کاهش دهد. بنابراین ابتدا قطعات ریز قراضه مانند براده‌های ماشین‌کاری و سپس قطعات درشت در کوره بار می‌شوند. آخرین لایه موادی که به بار کوره اضافه می‌شوند، قراضه‌های سبک می‌باشند، تا هنگامی که

الکتروود پایین آورده می‌شود، بتواند در داخل آنها فرو رفته و قوس بین الکتروود و بار کوره ایجاد شود و از ایجاد قوس بین الکتروود و دیواره جلوگیری گردد. نتیجه این کار حفاظت بیشتر از نسوز کوره است.

۴-۲-۳- کوره قوس الکتریک

یک طرح عمومی از کوره EAF در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. ظرفیت کوره EAF باید با ظرفیت تانک AOD یکسان باشد. عملیات EAF/AOD سوپراآلیاژها با ظرفیت 9000Kg می‌تواند انجام گیرد، اما اکثراً ظرفیت تولید این روش در حدود 36000kg انتخاب می‌شود.

دیواره کوره فولادی مدور با سیستم آبگرد و لایه نسوز آجری است. انتخاب آجرهای نسوز به نوع آلیاژ و طراحی کوره بستگی دارد. هزینه نسوز کاری یک کوره متوسط ۱۸ تنی تقریباً ۱۸ هزار دلار است. قسمت پایین کوره ثابت و سقف آن متحرک است. سقف کوره می‌تواند در یک صفحه افقی حرکت کرده و کاملاً از کوره دور شود تا بار به درون آن ریخته شود. سقف کوره دارای سه الکتروود گرافیتی است، که در داخل کوره قرار می‌گیرند. در قسمت جلو دیواره کوره مجرای خروج مذاب و در قسمت عقب آن دریچه سرباره‌گیری قرار دارد. کوره قوس تقریباً در داخل یک چاله قرار دارد، به نحوی که مجرای خروج مذاب و دریچه سرباره‌گیری تقریباً در کف کارگاه قرار می‌گیرند. وجود چاله اجازه می‌دهد، که پاتیل حمل مذاب و پاتیل سرباره می‌توانند تا نزدیکی کوره آورده شوند. سطح این پاتیل‌ها پایین‌تر از سطح مجراها قرار می‌گیرند. کوره قابلیت چرخش تا ۹۰ درجه به طرف جلو را دارد، تا فلز مذاب کاملاً به درون پاتیل ریخته شود. زاویه چرخش کوره به طرف عقب به منظور سرباره‌گیری حداکثر ۲۰ درجه است.

به دلیل پایین بودن چگالی مواد اولیه نمی‌توان همه آن را یکباره به کوره بار کرد. ابتدا بخشی از بار به کوره اضافه می‌شود و سقف کوره مجدداً در جای خود قرار می‌گیرد. الکتروودها به طرف شارژ حرکت می‌کنند و قوس الکتریکی بین بار و الکتروود ایجاد می‌شود. ابتدا قوس کم ولتاژ ایجاد می‌شود. با شروع به ذوب شدن بار الکتروودها پایین‌تر می‌روند و ولتاژ جریان افزایش می‌یابد. تا قوسی با طول بیشتر ایجاد گردد و در نتیجه بازدهی ذوب افزایش یابد. عملیات مزبور تا ذوب شدن همه بار ادامه پیدا می‌کند. سقف کوره کنار می‌رود و باقی مانده بار به کوره ریخته می‌شود (بارگذاری مجدد)، پس از بارگذاری مجدد، سقف کوره به محل قبلی خود برگشته و تا زمانی که کل بار ذوب شود، قوس برقرار می‌شود. پس از آن گرم کردن ذوب با دمش اکسیژن و آرگن می‌تواند انجام شود.

اکسیدهایی که در این مرحله به وجود می‌آیند، ممکن است بسیار خورنده باشند و به لایه نسوز کوره آسیب وارد کنند. ساییدگی نسوزها در همه ذوب‌ها اتفاق می‌افتد، ولی برای جلوگیری از آسیب‌های موضعی شدید نسوز دیواره، معمولاً آهک به بار کوره اضافه می‌کنند. آهک نقش سرباره ساز دارد و سرباره ایجاد شده در کوره به صورت دستی از آن گرفته می‌شود. برای سرباره‌گیری کوره به سمت عقب چرخیده و سرباره

جمع‌آوری شده، از دریچه سربراره‌گیری خارج می‌شود. این عمل در صورت نیاز و بسته به نوع بار قابل تکرار است.

پس از آنکه بخش عمده‌ای از سربراره تشکیل شده تخلیه گردید، یک نمونه آنالیز شیمیایی از ذوب تهیه می‌شود. بر مبنای ترکیب شیمیایی بدست آمده از این نمونه ممکن است دمش گاز ادامه یابد یا تعدادی از عناصر آلیاژی برای تنظیم ترکیب شیمیایی قبل از انتقال به واحد AOD به آن افزوده شود. زمان تقریبی مرحله EAF فرآیند EAF/AOD تقریباً ۱ تا ۳ ساعت است. پس از آماده شدن ذوب آن را به درون پاتیل انتقال مذاب می‌ریزند. پاتیل انتقال (یک ظرف نسوز کاری شده با مجرای خروج مذاب) در مقابل کوره قوس قرار داده می‌شود. کوره می‌چرخد و محتویات خود را به درون پاتیل می‌ریزد. ممکن است پاتیل با MgO نسوزکای شده باشد، تا با سربراره آهک مطابقت داشته باشد. امکان دارد موقع سربراره‌گیری ذرات سربراره بر روی مذاب شناور باقی بماند. قبل از ریختن مذاب برای جلوگیری از افت دمای مذاب در پاتیل، آن را پیش گرم می‌کنند. پاتیل انتقال مذاب به تانک AOD برده می‌شود و مذاب به درون تانک ریخته می‌شود.

۴-۲-۴- تانک AOD

در شکل ۴-۶ تانک AOD نشان داده شده است. دیواره تانک فولادی و نسوز کاری شده است. نمای بیرونی تانک شبیه به مخلوط کن‌های بتن با تنه مدور و سر مخروطی است که در محل قرارگیری خود می‌تواند بر روی یک صفحه عمودی چرخش نماید. ظرفیت تانک متناسب با ظرفیت کوره EAF و معمولاً کمتر از ۳۶ تن است. یکی از مشخصات ویژه تانک AOD این است که در کف آن تعدادی لوله برای دمش مخلوط اکسیژن و آرگن وجود دارد. این لوله تعدادی لوله هم مرکز هستند که از لوله مرکزی مخلوط آرگن و اکسیژن و از لوله بیرونی فقط گاز خنثی (معمولاً آرگن) برای خنک کردن انتهای لوله مرکزی دمیده می‌شود.

لایه نسوز تانک AOD شبیه نسوز کوره EAF است و در طی فرایند فرسوده می‌شود. کنترل درجه قلیایی سربراره یک عامل کلیدی برای اطمینان از آسیب ندیدن لایه نسوز از طرف سربراره می‌باشد. اولین مرحله در تانک AOD کربن زدایی مذاب است. اگر درون مذاب اکسیژن خالصی دمیده شود، نتیجه کار نه تنها کربن زدایی مذاب نخواهد شد بلکه کروم بیشتری به اکسید کروم تبدیل خواهد شد. برای اقتصادی کردن واکنش کربن‌زدایی، فشار جزئی اکسیژن دمیده شده به مذاب با اضافه کردن آرگن به آن کاهش داده می‌شود تا از مقدار کرومی که به اکسید کروم تبدیل می‌شود، کاسته شود. وقتی که مقدار کربن مذاب بالا باشد، نسبت آرگن به اکسیژن در مخلوط گازی ۳ به ۱ در نظر گرفته می‌شود. با کاهش مقدار کربن مقدار آرگن باید افزایش یابد. با نزدیک شدن به مرحله کربن زدایی کامل نسبت آرگن به اکسیژن تقریباً ۶ به ۱ در نظر گرفته می‌شود.

حرارتی که در اثر واکنش کربن زدایی به وجود می‌آید، مقداری از کروم را اکسید می‌کند. در اثر دمش گاز، سیلیسیم نیز اکسید می‌شود ولی حرارت ناشی از اکسیداسیون آن ناچیز است و اثر کمی در گرم کردن مذاب دارد. یادآوری این موضوع اهمیت دارد که تانک AOD فاقد منبع انرژی حرارتی خارجی سات و دمای آن در اثر واکنش‌های گرمازا افزایش پیدا می‌کند. چنانچه لازم باشد دمای مذاب پایین آورده شود، از قراضه جامد استفاده می‌شود. یکنواخت نگه داشتن دمای مذاب از لحاظ اقتصادی اهمیت دارد، زیار تبدیل عناصر آلیاژی با ارزش (به ویژه کروم و نیوبیوم) به سرباره تحت تاثیر دما انجام می‌گیرد. از فوق گذاز شدن مذاب باید جلوگیری کرد، زیرا خنک کردن و گرم کردن مجدد آن زمان بر بوده و بازیابی کامل عناصر آلیاژی موجود در سرباره را دشوار می‌سازد.

در طی فرآیند کربن زدایی به مذاب آهک اضافه می‌شود. آهک اضافه شده در مرحله دمش گاز کاملاً با مذاب مخلوط شده و درجه بالای از گوگرد زدایی مذاب به دست می‌آید. CaS حاصل از گوگردزدائی به صورت سرباره در می‌آید. چنانچه پس از نمونه‌گیری از ترکیب شیمیایی، کربن زدایی تا سطح مورد نظر انجام شده باشد، مرحله بازیابی عملیات AOD شروع می‌شود.

در این مرحله سرباره با عناصر ارزان قیمت (عموماً Si و Al مخلوط شده با آهک) واکنش داده می‌شود. این عناصر نسبت به عناصری نظیر Cr و Nb تمایل بیشتری برای تشکیل اکسید دارند و به همین دلیل اکسیدهای عناصر گران قیمت موجود در سرباره احیاء شده و عناصر فلزی به مذاب بر می‌گردند. درباره استفاده از ترکیب شیمیایی نمونه گرفته شده از پاتیل انتقال و مقدار اکسیژن دمیده شده به مذاب برای پیش‌بینی مقدار کروم و نیوبیوم اکسید شده‌ای که باید احیاء شود، نظریه‌های گوناگونی ارائه شده است. پس از اتمام مرحله بازیابی (توسط ترکیب شیمیایی نمونه گرفته شده از مذاب) سرباره‌گیری انجام می‌شود. به هنگام سرباره‌گیری تانک چرخیده و سرباره جمع‌آوری شده از سطح مذاب از دریچه خارج می‌شود. به هنگام سرباره‌گیری تانک چرخیده و سرباره جمع‌آوری شده از سطح مذاب از دریچه خارج می‌شود. پس از آن عملیات نهایی تنظیم ترکیب شیمیایی انجام می‌شود. سپس تانک بیشتر چرخیده و مذاب به درون پاتیل ریخته‌گری منتقل می‌شود.

۴-۲-۵- پاتیل ریخته‌گری

پاتیل ریخته‌گری و بار مذاب درون آن به محل ایستگاه ریخته‌گری منتقل می‌شوند. شکل ۴-۷ طرح کلی سیستم ریخته‌گری با قالب پر شونده از کف را نشان می‌دهد. با کنار رفتن تویی کف پاتیل، مذاب به بیرون جریان پیدا می‌کند. با وارد شدن مذاب به لوله بارریز مرکزی یا شیپوری می‌توان از یک جریان گاز آرگن برای جلوگیری از تماس مذاب با اکسیژن و نیتروژن اتمسفر استفاده کرد. لوله بارریز تعدادی راهگاه را که به صورت شعاعی در پیرامون آن قرار گرفته‌اند، پر می‌کند.

از طریق این راهگاه‌ها فلز مذاب از کف قالب به درون آن ریخته‌گری می‌شود. برای جلوگیری از واکنش بین جداره داخلی قابل و فلز مذاب پودرهای ویژه‌ای به سطح داخلی قالب زده می‌شود. اثر دیگر این پودرها بهبود کیفیت سطح شمش ریخته و نیز عایق حرارتی بودن است. در پایان ریخته‌گری ترکیب‌های گرم‌زایی به سطح قالب اضافه می‌شوند تا به عنوان عایق حرارتی سر الکترودهای در حال انجماد را گرم نگه دارند. لذا این قسمت می‌تواند به عنوان تغذیه عمل نماید و انقباض‌های ناشی از انجماد قسمت‌های مرکزی شمش را جبران کند.

قالب الکترودهای کربن زدایی شده با آرگن و اکسیژن را می‌توان از سر قالب ریخته‌گری کرد اما به دلیل مشکلاتی مانند دشوار بودن این روش، مسائل ایمنی و طولانی بودن زمان ریخته‌گری، عموماً از روش ریخته‌گری قالب پر شونده از کف استفاده می‌شود.

۴-۳- مروری بر ذوب القایی در خلاء (VIM) [۱۳]

۴-۳-۱- در فرآیند ذوب القایی تحت خلاء در مقایسه با فرآیندهای ذوب در هوا، مقدار اکسیژن و نیتروژن مذاب به مقدار قالب توجهی کاهش می‌یابد. در نتیجه سوپرالیاژهای تولید شده با VIM اکسیدها و نیتريد‌های کمتری داشته و نسبت به سوپرالیاژهای تولید شده به روش EAF/AOD تمیزتر هستند. بعلاوه عناصر دارای فشار بخار بالا (به ویژه سرب و بیسموت) که ممکن است از طریق قراضه وارد شده باشند، در طی فرآیند ذوب به این روش حذف می‌شوند. مجموع این عوامل باعث بهبود خواص خستگی و گسیختگی خزش سوپرالیاژهای تولید شده با VIM در مقایسه با روش EAF/AOD می‌شوند.

کنترل عناصر آلیاژی در این روش خیلی دقیق‌تر از روش EAF/AOD است و تولید به روش VIM پر هزینه‌تر از روش EAF/AOD است. در فرآیند EAF/AOD اصلاح ترکیب شیمیایی (کاهش عناصری مانند Al, Si, S, Ti, C و ...) صورت می‌گیرد ولی در فرآیند VIM ترکیب شیمیایی نهایی به ترکیب بار وارد شده به کوره بسیار نزدیک است. ممکن است در مقدار کربن کاهش جزئی صورت گیرد. در فرآیندهای VIM جدید مرحله گوگردزدایی نیز وجود دارد. در این روش ترکیب شیمیایی مذاب توسط ترکیب بار وارد شده به کوره تعیین می‌شود؛ به همین دلیل قیمت مواد اولیه فرآیند VIM در مقایسه با مواد اولیه استفاده شده در فرآیند EAF/AOD گران‌تر است.

۴-۳-۲- تشریح فرآیند VIM

بار کوره عموماً دارای سه بخش است: بخش مواد خام که قبلاً در خلاء ذوب نشده‌اند، بخش دیرگداز که شامل عناصر خالصی است که اکسیدهای پایدار تشکیل می‌دهند و تمایل دارند قابلیت انحلال اکسیدها و نیتريد‌های موجود در مواد خام را افزایش دهند. بخش آخر بار شامل قراضه‌های داخلی و خارجی است که قبلاً در خلاء ذوب شده‌اند. به خاطر اینکه امکان دارد قراضه‌ها در طی تولید آلودگی پیدا کرده باشند، لازم است دقت کافی در جدایش و آماده سازی آنها قبل از وارد شدن به فرآیند VIM انجام گیرد. ابتدا بخش

مواد خام بار درون کوره VIM قرار داده می‌شود. این عمل ممکن است با باز شدن سقف کوره و یا بارگذاری توسط یک محفظه تحت خلاء نصب شده در بالای سر کوره انجام گیرد. کوره قابلیت ایجاد سریع خلاء کمتر از ۱۰۰ (و اغلب کمتر از ۱۰) را دارد. با ایجاد جریان القایی توسط سیم پیچ‌های مستقر در محیط بوتله نسوز. مواد خام ذوب می‌شوند. پس از ذوب کامل، مواد گاززدائی می‌شوند. در اینجا ممکن است مقدار دیگری از مواد به بار ذوب شده اضافه شود تا وزن آن به مقدار برنامه‌ریزی شده برسد.

پس از کامل شدن ذوب یک نمونه ترکیب شیمیایی از آن گرفته می‌شود. بر اساس ترکیب شیمیایی نمونه، افزودنی‌های لازم به ذوب اضافه می‌شود، تا ترکیب شیمیایی آن به حد مورد نظر برسد. با توجه به اینکه در این فرآیند تغییرات قابل توجهی در ترکیب شیمیایی صورت نمی‌گیرد، لذا باید در تنظیم ترکیب شیمیایی ذوب بدست آمده دقت کرد تا در صورت نیاز بتوان مجدداً آن را تکرار نمود. پس از به پایان رسیدن مرحله اضافه کردن مواد افزودنی، دمای مذاب به دمای مناسب برده شده و به درون قالب‌ها ریخته‌گری می‌شود.

مذاب با وجود اینکه در خلاء تولید شده ولی مقدار قابل توجهی سرباره ایجاد شده از اکسیژن زدایی، گوگرد زدایی و ذرات نسوز کوره دارد. در حین ریخته‌گری مذاب تا حد ممکن سعی می‌شود که ذرات سرباره به داخل قالب راه پیدا نکنند. عموماً از سیستم ریخته‌گری برای هدایت فلز مذاب به قالب که دارای تعدادی تله برای به دام انداختن ذرات سرباره است، استفاده می‌شود. سیستم ریخته‌گری در نهایت به بار ریز ختم می‌شود. در بار ریز همواره مقداری مذاب وجود دارد، تا ذرات سرباره راه یافته به آن شناور شده و از جریان مذاب ریخته‌گری حذف شوند. جریان مذاب از کف بار ریز خارج می‌شود. زمان ریخته‌گری توسط قطر افشانک بار ریز و دمای ریخته‌گری تعیین می‌شود.

سوپرآلیاژهای تولید شده به روش VIM به ندرت در شرایط ریخته‌ استفاده می‌شوند و به کارگیری آنها در شرایط کار شده مناسب‌تر است. یکی از برتری‌های این روش استفاده از شمش‌های آن در عملیات ذوب مجدد برای بهبود ساختار آلیاژ و افزایش درجه تمیزی آن است. قالب‌های VIM می‌توانند برای ذوب مجدد به روش‌های VAR [۱۴] و ESR [۱۵] استوانه‌ای باشند یا برای ذوب مجدد به روش ESR تختال در نظر گرفته شوند. در اصطلاح فنی به محصولات ریخته تولید شده به این روش شمش گفته نمی‌شود، بلکه با عنوان الکتروود شناخته می‌شوند، و این نام نشانگر آن است که مواد نیمه تمام بوده و از آنها در فرآیند ذوب بعدی استفاده خواهد شد.

۴-۴- عملیات ذوب القایی در خلاء

۴-۴-۱- عملیات ذوب القایی در خلاء

بار VIM بر حسب ترکیب شیمیایی هدف محاسبه می‌شود. محاسبه انجام شده بر مبنای استفاده از سه نوع مختلف مواد به علاوه یک فاکتور تصحیح است. نوع اول مواد که با عنوان مواد خام یا تازه توضیح داده شدند، دارای عناصر خالص هستند. این مواد ممکن است دارای اکسیژن و نیتروژن حل شده باشند. اکسیژن در طی

عملیات ذوب کاهش خواهد یافت. کاهش نیتروژن در فرآیند VIM با سرعت پایینی صورت می‌گیرد و باید در انتخاب مواد اولیه از مواد کم نیتروژن استفاده کرد. تفاوت اصلی بین مواد خام و بقیه مواد در این است که سطح گاز محلول آنها با عملیات ذوب در خلا قبلی کاهش نیافته است.

بر پایه این تعریف مواد خام از نظر اقتصادی نوع مهمی از تولیدات فرآیند EAF/AOD هستند. این مواد از بازیافت سوپرالیاژهای برگشتی از خط تولید، فلز باقی مانده به دیواره کوره و براده‌های ماشین‌کاری و پوسته‌کنی با اندازه کوچک هستند، که می‌توان مستقیماً در کوره VIM از آنها استفاده کرد. بعضی از مواد با فرآیند EAF/AOD تولیدی می‌شوند که دارای کربن و عناصر فعال کمی هستند. این مواد حتی اگر با VIM هم تولید شوند اکسیژن زیادی خواهند داشت و باید بدون توجه به روش تولید و اینکه قراضه فرآیند VIM هستند از آنها به عنوان مواد خام استفاده کرد.

دسته دوم تحت عنوان مواد فعال شناخته می‌شوند. مواد فعال عموماً مواد خالص هستند. این مواد عمدتاً Ti و Al اکسیدها و نیتريد‌های پایدار تشکیل می‌دهند و قابلیت انحلال گازها را در بار کوره افزایش می‌دهند. این مواد باید توزین شده و جداگانه نگهداری شوند و فقط پس از گاززدایی کامل مذاب به آن افزوده شوند. دسته سوم مواد برگشتی هستند. در طی فرآیندهای تولید سوپرالیاژها مقدار زیادی قراضه تولید می‌شود. بازیافت این قراضه، هم قراضه داخلی (مانند قراضه ذوب) و هم قراضه خارجی (مانند قراضه مراحل ساخت و نصب قطعات) یک کار اقتصادی بسیار مهم در صنعت سوپرالیاژهاست. قطعات بزرگ قراضه در طی فرآیند ذوب و مرحله شکل دادن سوپرالیاژ تولید می‌شوند. این قطعات ممکن است مستقیماً به کوره VIM ریخته شوند. البته باید امکاناتی برای تشخیص ترکیب شیمیایی آنها وجود داشته باشد. یک منبع بزرگ دیگر قراضه‌های برگشتی براده‌های فرآیند ماشین‌کاری است.

براده‌ها باید جداگانه نگهداری شوند و به شکل فشرده باشند، تا بهتر به کوره بار شوند. هم چنین محلول آب و صابون و روغن به جای مانده از ماشین‌کاری آنها باید زدوده شود. قید و بندهایی که برای نگهداشتن قطعات در ماشین‌کاری استفاده می‌شوند، ممکن است دارای سرب و بیسموت باشند. چنانچه براده‌های ماشین‌کاری به این فلزات آلوده شده باشند، وجود سرب و بیسموت در سوپرالیاژ تولید شده اثرات بسیار مخربی بر جای خواهد گذاشت. برای جلوگیری از این شرایط لازم است از هر توده براده نمونه کوچکی تهیه نموده و آن را ذوب کرد و سپس آنالیز شیمیایی آن را به دست آورد. با توجه به اینکه ممکن است آلودگی در توده براده‌ها یکنواخت توزیع نشده باشد. لذا نتایج آنالیز نمونه ممکن است. در پیش‌بینی مقدار آلودگی سرب و بیسموت گمراه کننده باشد. خوشبختانه چنانچه سطح این آلودگی‌ها در بار کوره پایین باشد، در طی فرآیند VIM مقدار خیلی زیادی از آنها حذف می‌شود، ولی اگر سطح آلودگی بالا باشد پس از ذوب در خلاء کاملاً حذف نمی‌شوند، مگر اینکه تشخیص داده شوند که در این صورت باید زمان فرآیند بیشتر از حد معمول در نظر گرفته شود و این حالت از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.

قراضه برگشتی حتماً نباید ترکیب شیمیایی بار را داشته باشد. با محاسبه وزن مواد خام و اختلاف ترکیب شیمیایی آنها به راحتی می‌توان از قراضه‌های مختلف استفاده کرد.

عامل باقی‌مانده در محاسبه بار کوره VIM پیش‌بینی مقدار ماده‌ای است که قرار است از فرآیند ذوب گرفته شود. وقتی که مذاب VIM تخلیه می‌شود مقداری از فلز مذاب به دیواره بوته می‌چسبد. در فرآیند ذوب بعدی فلز باقی‌مانده مجدداً ذوب می‌گردد. به همین خاطر ترکیب‌های شیمیایی ذوب‌های متوالی در فرآیند VIM باید با یکدیگر مطابقت داشته باشند. به هنگام محاسبه بار یک عامل تصحیح بخاطر تغییر ترکیب شیمیایی به وجود آمده از مواد بر جای مانده از ذوب قبلی باید در نظر گرفته شود. این عامل تصحیح بر مقدار و نوع مواد خام اثر خواهد گذاشت. تحت بعضی شرایط قبل از شروع عملیات ذوب، بوته را با یک پاک‌کننده مواد باقی‌مانده برای ذوب ترکیب جدید آماده می‌کنند. ذوب‌های آماده‌ساز عموماً غیرآلیاژی بوده و اجزاء اصلی ذوب بعدی را تشکیل می‌دهند.

۴-۲-۴- کوره القایی تحت خلاء

کوره دارای یک پوسته فولادی متصل به سیستم ایجاد خلاء سریع است. کوره‌ها از سقف یا بدنه باز می‌شوند و از این نظر طرح‌های مختلف کوره‌های VIM تفاوت کمی با یکدیگر دارند. بوته در مرکز کوره قرار دارد. ظرفیت بوته ۴۵۰۰ تا ۲۲۷۵۰ کیلوگرم است. نسوز دیواره بوته یکپارچه نیست و در آن از آجرهای نسوز (دو لایه آجر نسوز، یک لایه پشتیبان که از سیم پیچ القایی حفاظت می‌کند و یک لایه بیرونی که در تماس با فلز مذاب است) استفاده می‌شود. پس از مدتی ضخامت این لایه نسوز کاهش می‌یابد و آن را تعویض می‌کنند. یک عامل اصلی در کاهش عمر نسوز دیواره بوته انقباض و انبساط و انقباض نسوز در طی چند ذوب متوالی است. آجرهای نسوز تجاری اکثراً به طور کامل تف جوشی نشده و در حین کار منبسط می‌شوند و ظرفیت کوره را پایین می‌آورند. در انتخاب آجرهای نسوز باید به مقاومت سایشی و انبساط کنترل‌کننده عمر لایه نسوز و مدت زمان عملیات VIM توجه نمود.

بعد از لایه نسوز، سیم پیچ‌های القایی هستند که از جنس لوله‌های مسی آب‌گرد می‌باشند. با عبور جریان القایی بار جامد ذوب می‌شود. پس از ذوب شدن کامل بار جریان القایی باعث تلاطم ذوب می‌شود. فرکانس بهینه در سیم پیچ القایی برای حرارت دادن بار با شکل، اندازه و حالت بار (جامد یا مذاب) تغییر می‌کند. در تجهیزات قدیمی از یک فرکانس استفاده می‌شد اما تجهیزات جدید با فرکانس‌های مختلفی کار کرده و ذوب را سریعتر آماده می‌کنند. در بعضی از کوره‌های VIM سیم پیچ‌هایی در مقاطع مختلف کوره نصب شده‌اند. پس از آماده شدن ذوب از این سیم پیچ‌ها می‌توان برای به هم زدن مذاب استفاده کرد بدون اینکه انرژی اضافی برای این کار مصرف شود.

در اکثر کوره‌های ذوب القایی در خلاء یک محفظه بارگذاری تحت خلاء در بالای بوته نصب شده است. موادی که بعداً به ذوب اضافه می‌شوند از طریق این محفظه به درون بوته ریخته می‌شوند. نحوه کار بدین

شکل است که مواد اضافه شونده درون یک طرف کف ریز قرار داده می‌شوند و سپس ظرف کفریز و محتویات آن در داخل محفظه قرار می‌گیرند. درب محفظه بسته و در آن خلاء ایجاد می‌شود. دریچه‌هایی که محفظه بارگذار تحت خلاء را از کوره ذوب در خلا جدا می‌کنند، باز می‌شود. ظرف کف ریز تا نزدیکی سطح مذاب پایین می‌رود و کف آن باز می‌شود، تا مواد به داخل بوتله ریخته شوند.

کوره‌های قدیمی ذوب القایی در خلاء با یک محفظه ساخته می‌شدند. در این نوع کوره‌ها قالب ریخته‌گری در داخل کوره ذوب القایی قرار می‌گرفت. یکی از معایب کوره‌های قدیمی این بود که پس از هر بار پر شدن قالب باید کوره باز می‌شد تا قالب پر شده را خارج کنند و قالب جدید کار گذاشته شود. در کوره‌های جدید یک محفظه تحت خلاء جداگانه برای قالب‌ها وجود دارد (کوره‌های دو محفظه‌ای). در هر نوع کوره قالب‌های آماده شده باید پس از آماده شدن ذوب به قسمت ریخته‌گری منتقل شوند. در شکل ۴-۲ طرح کوره VIM دو محفظه‌ای نشان داده شده است.

۴-۳- سیستم‌های ریخته‌گری

سیستم‌هایی که فلز مذاب را انتقال می‌دهند ناودانک نام دارند. ناودانک‌ها لوله‌های فولادی نسوزکاری شده‌ای هستند که در کوره‌های VIM دو محفظه‌ای از آنها استفاده می‌شود. اگر اندازه ناودانک بزرگ باشد، از آجرهای نسوز در آن استفاده می‌شود، ولی در ناودانک‌های کوچک از نسوزهای کوبیدنی یا تف جوشی شده استفاده می‌شود. در ناودانک‌ها موانع و تله‌هایی در مسیر جریان فلز مذاب به قالب ایجاد می‌کنند، تا از ورود سرباره به داخل قالب جلوگیری شود.

حذف نهایی سرباره توسط بارریز صورت می‌گیرد. مذاب پس از خروج از ناودانک در داخل بارریز ریخته می‌شود (در بعضی از سیستم‌های ریخته‌گری راحی شده مذاب مستقیماً از بوتله به بارریز ریخته می‌شود). در بارریز ارتفاع فلز مذاب را به نحوی انتخاب می‌کنند که در ته آن یک جریان آرام برقرار شود. در ته بارریز افشانک قرار دارد و فلز مذاب توسط آن وارد قالب می‌شود. ممکن است در بارریز هم موانعی برای جذب ذرات سرباره وجود داشته باشد.

یکی از مهم‌ترین عوامل موجود در بارریز زمان قرارگیری مذاب در داخل آن است. این مدت زمان کنترل کننده مقدار سرباره شناور شده است. با تنظیم سرعت ورودی مذاب از ناودانک به بارریز ارتفاع فلز مذاب در بارریز ثابت نگه داشته می‌شود. با ثابت ماندن دمای فلز مذاب و ارتفاع آن در بارریز سرعت خروج مذاب از افشانک بارریز ثابت باقی می‌ماند.

قالب‌های ریخته‌گری عموماً از مواد فلزی (معمولاً چدن) هستند، ولی استفاده از فولاد آهنگری شده نیز افزایش یافته است. عمر قالب و قیمت تمام شده آن تعیین کننده نوع قالب ریخته‌گری هستند. خستگی حرارتی مهم‌ترین عامل از کار افتادگی قالب‌ها است. مقاومت شکست فولادهای آهنگری شده بیشتر از چدن است، عوامل دیگری نیز در فرسوده شدن قالب‌ها موثر هستند، از جمله برخورد مستقیم جریان مذاب به

دیواره قالب که در این حالت قالب‌های ارزان چدنی مناسب‌تر هستند. دیواره قالب‌ها برای کمک به خارج شدن الکتروود جامد از درون قالب شیب کمی دارد. انقباض الکتروود منجمد شده آن را از دیواره قالب جدا می‌کند، به نحوی که به نیروی زیادی برای جدا کردن الکتروود از قالب نیاز نیست.

۴-۴-۴- عملیات ذوب القایی در خلاء

مراحل ذیل نحوه تولید مذاب در کوره VIM دو محفظه‌ای را نشان می‌دهد. اکثر مراحل عملیات VIM از این روش پیروی می‌کنند ولی جزئیات بعضی از عملیات‌های ویژه مانند اندازه‌گیری‌های تحت خلاء متفاوت هستند.

پس از کامل شدن عملیات ذوب قبلی محفظه ذوب از محفظه قالب جدا می‌شود. مقدار خلاء محفظه ذوب یادداشت می‌شود. تمام دریچه‌های خلاء بسته می‌شوند و پس از مدتی در حدود ۳ دقیقه افت خلاء محفظه ثبت می‌شود. افت خلاء به خاطر وجود نشت در کوره به وجود می‌آید. پمپ‌های بزرگ استفاده شده در کوره‌های VIM می‌توانند خلاء زیادی ایجاد کنند، که افت خلاء ناشی از نشست را جبران می‌کند. بلافاصله پس از اطمینان از اینکه خلاء لازم در کوره ایجاد شده است، افزودن بخش مواد خام از محفظه بارگذار شروع می‌شود. در شروع ذوب توان کامل ذوب به کار گرفته می‌شود وقتی که کل بار ذوب شد، دمای آن کنترل می‌گردد و برای عملیات گاززدایی تنظیم می‌شود. سرعت تخلیه محفظه افزایش پیدا می‌کند، زیرا گازهای خارج شده از بار ذوب باید به بیرون کوره منتقل شوند. با کاهش فشار جزئی گاز در محفظه گاز بیشتری از ذوب خارج می‌شود به طور مثال کربن وجود دربار با اکسیژن ترکیب شده و به صورت CO آزاد می‌شود. پیشرفت گاززدایی با اندازه‌گیری سرعت تخلیه در زمان‌های مختلف پی‌گیری می‌شود. وقتی که سرعت تخلیه ثابتی برقرار شد بدین معنی است که گاززدایی مذاب خاتمه یافته است.

کنترل دما در طی فرآیند با دماسنج‌های نوری انجام می‌شود. ممکن است گفته شود که استفاده از دماسنج‌های نوری نتایج خیلی دقیقی به همراه ندارد. باید خاطرنشان ساخت که استفاده از دماسنج نوری وقتی که سطح مذاب شروع به سرد شدن می‌کند، با دقت زیادی دمای مذاب را اندازه‌گیری می‌کند و کنترل‌های بعدی دما نیز برای اندازه‌گیری فوق‌گداز مورد نیاز انجام می‌شود.

پس از گاززدایی کامل ذوب، افزودن بخش قراضه‌های برگشتی بار شروع می‌شود. عناصر نسوز یا قسمتی از آن ممکن است به همراه این بخش افزوده شود. مقداری آلومینیوم برای اکسیژن‌زدایی و کلسیم نیز برای گوگردزدایی ذوب به آن افزوده می‌شود. برای افزودن کلسیم عموماً از افزودنی‌های نیکل - کلسیم، آهک یا ترکیبی از این دو استفاده می‌شود. CaS تشکیل شده به سرباره تبدیل می‌شود و بخشی جزئی از آن به دیواره بوته می‌چسبد. برای اطمینان از عدم برگشت CaS چسبیده به دیواره باید مقداری آلومینیوم در مذاب وجود داشته باشد.

باید خاطر نشان ساخت که استفاده اولیه از VIM در سوپرآلیاژها بدون استفاده از مواد سرباره ساز بوده است. با شناخت اثرات مخرب گوگرد بر خواص سوپرآلیاژهای دما بالا، نیاز به کاهش مقدار گوگرد و اصلاح ترکیب شیمیایی مذاب برای بهبود خواص مکانیکی پیدا شد. هم اکنون همه ذوب‌های VIM دارای ترکیبات سرباره ساز و نیز ترکیبات اکسیدی شناور بر روی سطح مذاب هستند. برای جلوگیری از ورود این مواد به داخل الکترودهای ریخته باید دقت کافی به عمل آید.

وقتی که ذوب قراضه‌های برگشتی، کنترل گوگرد و افزودن مواد نسوز به انجام رسید و ذوب آماده شد، یک نمونه ترکیب شیمیایی از آن تهیه می‌شود. بر مبنای آنالیز به دست آمده از روی این نمونه، مقدار وزنی افزودنی‌های آلیاژی برای رساندن آنالیز به دامنه ترکیب شیمیایی مورد نیاز محاسبه می‌شود. افزودنی‌های مورد نیاز به مذاب اضافه می‌شوند. در صورتی که مقدار مواد افزودنی زیاد باشد، نمونه دوم آنالیز شیمیایی برای اطمینان از درستی ترکیب شیمیایی برداشته می‌شود. پس از آماده شدن ذوب ناودانک از میان دریچه بین دو محفظه عبور کرده و بر روی بارریز قرار می‌گیرد. بارریز قبلاً پیش گرم شده است.

قبل از ریخته‌گری، دمای ذوب با دماسنج نوری کنترل می‌شود و صحت آن توسط اندازه‌گیری دما با ترموکوپل کنترل می‌شود. کنترل دمای ریخته‌گری به دلیل اینکه سیال بودن مذاب و سرعت ریخته‌گری از افشانک بارریز را تحت تاثیر قرار می‌دهد، اهمیت دارد. دمای ریخته‌گری باید به حد کافی بالا باشد، تا مذاب به دیواره افشانک نچسبد و آنقدر بالا نباشد، که TiN تشکیل شده بتواند در مذاب حل شود. اغلب برای اطمینان از گوگردزدایی کامل، منیزیم به صورت نیکل - منیزیم به مذاب اضافه می‌شود. در این صورت گوگرد موجود در سوپرآلیاژ کار شده نهایی به صورت MgS در خواهد آمد. MgS به صورت ذرات کروی تشکیل می‌شود (برخلاف سایر سولفیدها که به صورت لایه‌های نازک مرزخانه‌ای ظاهر می‌شوند). MgS تشکیل شده به نحو قابل ملاحظه‌ای انعطاف‌پذیری آلیاژ را افزایش می‌دهد. عنصر منیزیم دارای فشار بخار بالایی است و تحت خلاء جزئی یا کامل نمی‌تواند در مذاب باقی بماند و تبخیر می‌شود. به همین دلیل آرگن به محفظه خلاء وارد می‌کنند، تا فشار محیط افزایش یافته و تبخیر منیزیم کنترل شود. به رسوب گرد و غبار منیزیم بر روی دیواره‌های کوره از نظر ایمنی باید توجه کرد، زیرا آتش‌زا است و غبار منیزیم نیز ممکن است در اثر جرقه منفجر شود.

قبل از ریخته‌گری، نمونه نهایی از ترکیب شیمیایی گرفته می‌شود. با خم شدن بوته، فلز مذاب زیر سرباره به آرامی در ناودانک جریان پیدا می‌کند. در ابتدا به منظور پر کردن سریع بارریز، سرعت جریان ریزش مذاب از بوته و ناودانک زیاد است. وقتی که بارریز تا سطح مطلوب پر شد، زاویه چرخش بوته کاهش می‌یابد، تا سطح مذاب در بارریز در ارتفاع ثابتی نگه داشته شود. شروع ریخته‌گری با بارریز قرار گرفته در بالای سر قالب انجام می‌گیرد، به همین لحاظ اندکی قبل از رسیدن بارریز به ظرفیت کامل ریخته‌گری شروع می‌شود. با پر شدن هر یک از قالب‌های الکتروود قالب بعدی در زیر جریان مذاب قرار داده می‌شود (جریان مذاب معمولاً

پیوسته است). آخرین مذاب موجود در بوته در یک قالب جداگانه ریخته می‌شود. احتمال وجود ذرات سرباره در آخرین قالب وجود دارد. به همین دلیل از آن به عنوان الکترو استفاده نمی‌شود.

با شروع عملیات ذوب بعدی الکترودهای ریخته نیز در محلی نگه داشته می‌شوند، تا زمانی که انجماد آنها کامل شود. سپس از قالب‌ها بیرون کشیده می‌شوند. در بسیاری از آلیاژها الکترودهای ریخته قبل از ذوب مجدد تابکاری می‌شوند و ممکن است الکترودها مستقیماً به کوره تابکاری منتقل شوند. محصولات ریخته‌گری استاتیکی شده دارای جدایش مثبت بالایی هستند و ذوب مجدد آنها برای بدست آوردن ساختار ریخته‌گری مطلوب باید کنترل شده باشد. انجماد الکترودها از دیواره قالب شروع شده و به طرف مرکز پیشروی می‌کند و به همین دلیل مک‌های انقباضی در خط مرکزی الکترو متمرکز می‌شوند. به این عیوب «مک‌های ثانویه» گفته می‌شود. مک‌های اولیه نیز در اثر تغییر حجم ناشی از انجماد در محل سه الکترو، به وجود می‌آیند. انقباض اولیه با بکار بردن پوشش گرم‌مازای روی سطح فوقانی الکترو حذف می‌شود. پوشش گرم‌مازای ماده‌ای است که سطح فوقانی الکترو را نسبت به سطوح پایین‌تر آن برای مدت زمان طولانی‌تری در حالت مذاب نگه می‌دارد. در این صورت مذاب باقی مانده در داخل حفره‌های انقباضی نفوذ کرده و آنها را تغذیه می‌کند. قسمت فوقانی الکترو بعداً بریده شده و حفره‌های انقباضی اولیه حذف می‌شوند. مقدار ماده هدر رفته در این ناحیه ناچیز است. دانستن این موضوع اهمیت دارد که با افزایش نسبت طول به قطر حفره‌های انقباضی، پوشش گرم سر الکترو نمی‌تواند همه حفره‌های انقباضی را حذف کند. این نسبت در یک الکترو به قطر ۴۳cm و طول ۳۸۰cm تقریباً ۹ بر ۱ است.

۴-۵- مروری بر ذوب مجدد

۴-۵-۱- ریخته‌گری استاتیکی فرآیندی است که برای ریخته‌گری حجم زیادی از فلز مذاب به درون قالب انجام می‌شود. کنترل انجماد توسط طراحی قالب و تغذیه فلز برای حذف مک صورت می‌گیرد. در قطعات بزرگ ریخته سرعت انجماد پایین است و عیب جدایش مثبت شکل می‌گیرد. به همین خاطر تولید سوپرآلیاژها به روش‌های EAF/AOD یا VIM معمولاً با ریخته‌گری استاتیکی آلیاژ در الکتروها برای استفاده در عملیات ذوب بعدی تحت شرایط کنترل شده انجام می‌شود.

دو فرآیند عمده برای ذوب مجدد وجود دارد که عبارتند از فرآیندهای VAR و ESR. در هر دو فرآیند الکترو در یک بوته آبگرد قرار داده می‌شود. سطح الکترو تا درجه حرارت ذوب گرم می‌شود. قطرات فلز مذاب چکیده از الکترو در بوته جمع شده و به سرعت منجمد می‌شوند. با مصرف شدن الکترو، سطح ذوب شونده به بوته نزدیکتر می‌شود تا فاصله یکنواختی بین سطح ذوب شونده و محل انجماد فلز مذاب برقرار شود. با وجود این وجوه اشتراک عمومی، روش‌های بسیار متفاوتی برای ذوب سطح الکترو وجود دارد. متفاوت بودن این روشها، به تفاوت سرعت انجماد و طبیعت عیوب بوجود آمده در ذوب مجدد اشاره دارد.

۴-۵-۲- تشریح فرآیند ذوب مجدد در خلاؤه با قوس الکتریکی (VAR)

در روش VAR الکتروود در محفظه خلاء که در آن بوته آبگرد قرار دارد، ذوب مجدد می‌شود. یک جریان برق مستقیم از میان الکتروود و پایه بوته عبور می‌کند. با بیرون کشیده شدن الکتروود قوسی بین پایه بوته و نوک الکتروود ایجاد می‌شود. حرارت ایجاد شده توسط قوس سطح انتهایی الکتروود را ذوب می‌کند و قطرات فلز مذاب بر روی پایه مسی ریخته و منجمد می‌شوند. با افزایش حجم فلز روی پایه مسی (شمش) یک حالت تعادل بین شمش جامد، ناحیه خمیری و ناحیه مذاب ایجاد می‌شود. به خاطر اینکه در شرایط تعادلی انتقال حرارت از طریق دیواره‌های جانبی سریع‌تر از انتقال حرارت توسط شمش و پایه مسی است، نواحی خمیری و مذاب در نزدیکی دیواره‌ها نسبت به مرکز شمش نازک‌تر هستند. همان‌گونه که در بخش انجماد گفته شد، ضخامت ناحیه خمیری و زاویه رشد عوامل تعیین کننده پیدایش عیب جدایش مثبت ناشی از ترکیب شیمیایی مایع بین دندریتی هستند.

ضخامت ناحیه خمیری در مرکز شمش VAR، به وسیله میزان انتقال حرارت، قطر بوته و سرعت ذوب شدن سطح الکتروود کنترل می‌شود. سرعت ذوب الکتروود به وسیله مقدار جریان عبوری از میان الکتروود تعیین می‌شود. عوامل کنترل کننده دیگری که در ساختار انجماد نقش مثبت دارند، فاصله بین سطح ذوب شونده و سطح حوضچه مذاب و فاصله الکتروود از بوته هستند.

زمانی که سطح الکتروود ذوب می‌شود، قطرات مذاب فوراً تحت تاثیر وزن خود سقوط می‌کنند و به همین دلیل VAR فرآیندی است که در آن فوق‌گداز وجود ندارد. همچنین قابلیت انتقال حرارت بالا روش VAR را به روش تجاری برای تولید شمش‌هایی با قطر بالا از آلیاژهایی که تمایل به جدایش دارند، تبدیل کرده است. به علاوه وجود قطرات ریز مذاب در محیط خلاء، امکان حذف عناصر دارای فشار بخار بالا مانند سرب و بیسموت که در روش VIM امکان حذف کامل آنها نبود را فراهم ساخته است. متأسفانه عناصر مفید دارای فشار بخار بالا مانند منیزیم نیز به این طریق حذف می‌شوند. بی‌عیب بودن شمش‌های تولید شده با VAR قابل تضمین نیست. قوس الکتریکی منشاء تعدادی از عیوب موجود در شمش است. یکی از این عیوب عبارت است از جدایش منفی که اثرات آن به اندازه جدایش مثبت بر روی خواص آلیاژ مخرب نیست. این عیوب به صورت منفصل و ناپیوسته دیده می‌شوند و ممکن است وجود آنها در طراحی قطعات در نظر گرفته شود.

۴-۵-۳- تشریح فرآیند مجدد با سرباره الکتریکی (ESR)

ذوب مجدد با سرباره الکتریکی در خلاء انجام نمی‌گیرد. منبع حرارتی که سطح الکتروود را ذوب می‌کند، سرباره مذاب متشکل از CaF_2 و افزودنی‌های اکسیدی دیگر است. در این روش از جریان برق متناوب استفاده می‌شود. جریان الکتریکی از میان الکتروود، پوشش سرباره، شمش در حال انجماد و پایه مسی عبور می‌کند. در روش VAR قطرات فلز مذاب از میان خلاء می‌گذرند ولی در روش ESR از میان سرباره مذاب عبور می‌کنند. تماس فلز با سرباره در طی زمان عبور آن از میان سرباره اجازه می‌دهد که واکنش‌هایی بین

این دو صورت گیرد. در اثر واکنش فلز مذاب با CaF_2 به مقدار بسیار زیادی گوگردزدایی انجام می‌شود. کاهش مقدار عناصر سودمند دارای فشار بخار بالا نیز به اندازه روش VAR نیست. در ESR شمش تمیزتر و کم گوگردتر از روش VAR تولید می‌شود.

عمق غوطه‌وری الکتروود در سرباره نقش مشابه طول قوس در روش VAR دارد. در اینجا نیز قطر الکتروود و قطر بوته تعیین کننده عمق غوطه‌وری است. سرعت ذوب شدن مشابه روش VAR توسط توان ورودی تعیین می‌شود و با کنترل جریان می‌توان سرعت ذوب را کنترل کرد. فرآیند VAR برخلاف روش ESR، حجم زیادی سرباره دارد و به همین دلیل فرآیند ESR حساسیت شدیدی به تغییرات توان ورودی ندارد. به خاطر وجود سرباره به عنوان منبع حرارتی در ESR روابط بین ضخامت ناحیه خمیری و فاصله از دیواره بوته آبرگرد تغییر یافته است. در اولین تقریب می‌توان گفت که در یک سرعت ذوب ثابت و قطر بوته یکسان، عمق حوضچه مذاب ESR نسبت به VAR بیشتر است یعنی ESR در مقایسه با VAR نسبت به تشکیل جدایش مثبت حساس‌تر است، به بیان دیگر حداکثر قطر شمش قابل دسترس با ESR نسبت به VAR کمتر است. یک مزیت دیگر ESR توانایی آن برای تولید اشکال ساده است. حجم زیادی از سوپراآلیاژهای ورقه‌ای یا صفحه‌ای شکل را می‌توان به صورت الکتروودهای تختال ریخته‌گری کرد و سپس آنها را در داخل قالبهای ESR به صورت شمش‌های تختال بزرگتری درآورد. روش VAR معمولاً برای تولید شمش‌های گرد استفاده می‌شود.

۴-۶- عملیات ذوب مجدد در خلاء با قوس الکتریکی

۴-۶-۱- کوره VAR

در شکل ۴-۳ ساختمان کوره VAR نشان داده شده است. بوته VAR در یک تانک آب سرد شناور است. برای محدود کردن ضخامت جریان آبی که در سطح بیرونی بوته جریان دارد، اغلب از یک لوله که بوته را احاطه می‌کند، استفاده می‌شود. این عمل باعث افزایش سرعت جریان آب و افزایش انتقال حرارت از سطح بوته می‌شود. این لوله‌ها هادی آب نامیده می‌شوند. در پایه بوته مجراهایی برای ورود گاز خنثی (معمولاً هلیوم) پیش‌بینی شده است. وقتی که شمش در بوته منجمد می‌شود، به تدریج با سرد شدن شمش از دیواره بوته جدا می‌شود. در نتیجه انتقال حرارت از طریق دیواره بوته کاهش می‌یابد. برای اینکه انتقال حرارت در شمش منجمد شده به حداکثر رسانده شود گازی با ظرفیت حرارتی بالا مانند هلیوم به داخل شکاف ایجاد شده بین شمش و دیواره دمیده می‌شود.

در بالای بوته، درپوش کوره VAR، لوله‌های خلاء و نگه دارنده الکتروود قرار دارند. وظیفه نگهدارنده الکتروود هدایت آن به سمت بوته با ادامه مصرف الکتروود است. منبع توان الکتریکی از نوع DC است. اکثر کوره‌های VAR دارای دو ایستگاه (محل قرارگیری بوته) هستند. در یکی از این ایستگاه‌ها الکتروود در حال ذوب شدن است و ایستگاه بعدی برای شروع عملیات ذوب بعدی آماده می‌شود. وقتی که عملیات ذوب تمام شد،

درپوش VAR در صفحه افقی چرخیده و بالای سر الکتروود و بوته دوم قرار می‌گیرد. الکتروود از طریق یک رابط که بر روی الکتروود جوشکای شده است، به نگهدارنده متصل می‌شود. در طراحی‌های جدید، نگهدارنده الکتروود توانایی حرکت در صفحات افقی و عمودی را دارد. در این صورت امکان تنظیم صحیح الکتروود در مرکز بوته فراهم می‌شود. همچنین در صورتی که رابط جوشکاری شده بر روی الکتروود کاملاً در امتداد آن نباشد، در این صورت نگهدارنده می‌تواند به نحوی حرکت کند، که دیواره الکتروود با دیواره بوته کاملاً موازی شود.

۴-۶-۲- عملیات ذوب مجدد در خلاء با قوس الکتریکی

آماده‌سازی الکتروود تاثیر مهمی در کیفیت عملیات VAR دارد. وجود اکسیدها در الکتروود VAR نامطلوب است، زیرا ذرات اکسید را وارد سیستم می‌کند. بعضی از اکسیدها در دماهای بالا پایدار نیستند. ترکیبات اکسیدی تبخیر شونده یونیزه می‌شوند و قوس الکتریکی را ناپایدار می‌کنند. در نتیجه پیوستگی فرآیند از کنترل خارج می‌شود. به همین خاطر اکسیدهای سطحی الکتروودها را با سنگ زنی حذف می‌کنند. هوای کوره با پمپ خارج شده و سطح خلاء اندازه‌گیری می‌شود. سطح خلاء ایجاد شده متغیر است و در محدوده ۱۰-۰/۱ قرار دارد. تنها اثر شناخته شده خلاء بالا بهبود مقاومت قوس در برابر ناپایداری است.

قوس الکتریکی بین الکتروود و پایه مسی ایجاد می‌شود. برای برقراری قوس پایدار توان ذوب (شدت جریان الکتریکی) افزایش می‌یابد. اغلب برای گسترش سریع حوضچه مذاب در شروع، از قوس با آمپراژ بالا استفاده می‌شود. در ابتدا شکل حوضچه مذاب به نحو قابل ملاحظه‌ای با بقیه نواحی شمش متفاوت است، زیرا در شروع فرآیند انتقال حرارت زیادی از طریق پایه مسی صورت می‌گیرد.

۴-۶-۳- کنترل ذوب مجدد در خلاء با قوس الکتریکی

سه عامل اصلی موثر در فرآیند ذوب عبارتند از: قطر شمش و الکتروود. طول قوس الکتریکی و سرعت ذوب. قطر شمش و الکتروود لقی بین بوته و الکتروود را تعیین می‌کند. اگر لقی بین این دو به خاطر انتخاب نادرست فاصله یا خارج از مرکز بودن الکتروود کافی نباشد، بخشی از جریان الکتریکی از الکتروود به دیواره بوته منتقل خواهد شد. انتخاب قطر شمش میزان انتقال حرارت و در نتیجه سرعت ذوب را کنترل می‌کند. در نتیجه برای ممانعت از جدایش مثبت در شمش، در انتخاب قطر شمش باید دقت کرد. البته این انتخابها بلند مدت هستند و نمی‌توان آنها را روزانه کنترل کرد، زیرا نوع قالبها و بوته‌های خریداری شده را تعیین می‌کنند. طول قوس فاصله بین سطح ذوب شونده الکتروود و سطح فوقانی شمش منجمد شده می‌باشد. طول قوس مورد استفاده، $12/5-2/5$ mm است. قطر سطح ذوب شده الکتروود نیز، $25/4-18/8$ mm است.

ذوب مجدد در خلاء یک مدار با جریان مستقیم است. طول قوس را می‌توان به عنوان مقاومت این مدار فرض کرد. وقتی که شدت جریان ثابت باشد، افزایش یا کاهش مقاومت مدار (تغییرات طول قوس) ولتاژ را

تغییر خواهد داد. در نتیجه با ثابت نگه داشتن ولتاژ می توان طول قوس ثابتی را بر روی حوضچه مذاب برقرار کرد. در سیستم های مدرن کنترل قوس، برای این منظور از اندازه گیری فرکانس ریزش قطرات مذاب در کوتاه مدت (DSF) [۱۶] استفاده می شود.

مشخص شده است که فرکانس ریزش قطرات (معمولاً بر حسب دقیقه/قطره) با پهنای قوس ارتباط دارد. این ارتباط خطی نیست، اما می توان از آن به عنوان وسیله مفیدی در اندازه گیری و کنترل قوس استفاده کرد. با افزایش DSF طول قوس کاهش می یابد و در نتیجه فرکانس ریزش قطرات مذاب افزایش پیدا می کند. با تغییرات جریان الکتریکی، ارتباط بین قوس و DSF تغییر می کند. با افزایش جریان (افزایش سرعت ذوب) قطرات بزرگتری با فرکانس کم بوجود می آیند. افزایش جریان نیازمند کاهش DSF است، تا قوس تعادلی برقرار نگه داشته شود.

سرعت ذوب شدن الکتروود عامل مهم دیگری است که باید کنترل شود. سرعت ذوب شدن به شدت جریان الکتریکی بستگی دارد. بعضی از تولید کنندگان از یک شدت جریان ثابت در طول فرآیند ذوب استفاده می کنند. بعضی دیگر نیز در داخل کوره VAR از ابزار اندازه گیری وزن الکتروود و تغییرات آن برای محاسبه سرعت ذوب شدن استفاده می کنند. اندازه گیری های سرعت ذوب نیز مانند اندازه گیری های DSF تفاوت های زیادی با یکدیگر دارند. طراحی و نصب بارنماها از عوامل مهم در کنترل سرعت ذوب آلیاژ هستند. فرآیند با آمپراژ بالا شروع می شود و پس از آن ذوب شدن الکتروود بر حسب سرعت ذوب مورد نظر تنظیم می شود. به خاطر داشته باشید که تغییرات ولتاژ و DSF مستقل از یکدیگر نمی باشند. در پایان مرحله ذوب اگر الکتروود کاملاً مصرف شود، جریان به طور ناگهانی قطع شده و حوضچه مذاب منجمد خواهد شد. در اثر انجماد ناگهانی حوضچه حفره های انقباضی در مرکز شمش تشکیل خواهد شد. این حفره ها و مک ها باید با عملیات برشکاری سر شمش حذف شوند. برای اینکه مقدار دور ریز برشکاری به حداقل برسد، بهتر است در پایان عملیات ذوب قبل از اینکه الکتروود کاملاً مصرف شود (هنگامی که حدود $25/4\text{mm}$ از الکتروود باقی مانده است)، جریان الکتریکی را کاهش داده و به حوضچه مذاب اجازه داده شود که حرارت خود را به آرامی به لایه های پایین تر انتقال دهد، تا اینکه حوضچه کاملاً منجمد شود. در این صورت مک های انقباضی در سطح بیرونی شمش منجمد شده باقی مانده و نمی توانند به درون آن نفوذ کنند. این اقدام یک عمل اقتصادی است نه یک کار کیفی زیرا ناحیه مک دار بعداً برشکاری می شود.

۴-۷- عملیات ذوب مجدد با سر بار الکتریکی (ESR)

۴-۷-۱- کوره ESR

برخلاف بوتۀ VAR که در داخل و خارج دیواره آن سیستم خنک کننده آبگرد به کار برده شده است، یک پایه آبگرد بر دیواره نصب شده تا کف بوتۀ را تشکیل دهد. صفحه مطلع بین کف (پایه) و دیواره بوتۀ قرار داده می شود. در بوتۀ هایی که از سر باره مذاب برای شروع فرآیند استفاده می کنند، ممکن است کف بوتۀ

دارای سوراخی باشد که سرباره مذاب از آن به درون بوتۀ تزریق شود. برخلاف کوره VAR سقف بوتۀ بسته نیست، بلکه در معرض هوا کار می‌کند.

در سقف کوره ESR ننگه دارنده الکتروود و سلول‌های بار قرار دارند. این قسمت به صورت الکتريکی توسط ۴ میله عمودی که در اطراف بوتۀ و زاویۀ ۹۰ درجه با یکدیگر نصب شده‌اند، به پایه بوتۀ وصل شده است. سقف کوره می‌تواند قبل از شروع عملیات ذوب، برای تنظیم و استقرار الکتروود در مرکز بوتۀ، در صفحه افقی X-Y حرکت کند. توان ورودی کوره از نوع AC است. اکثر کوره‌های ESR دو ایستگاه ذوب دارند. وقتی که الکتروود در کوره‌ای در حال ذوب شدن است، ایستگاه دیگر برای عملیات ذوب آماده می‌شود. وقتی که یک ذوب تمام می‌شود، سقف کوره ESR بصورت افقی حرکت کرده و در ایستگاه دوم قرار می‌گیرد. (الکتروود از طریق میله رابط که به آن جوش داده شده است به ننگه دارنده وصل می‌شود).

۴-۷-۲- عملیات کوره ذوب مجدد با سرباره الکتريکی

برخلاف کوره VAR آماده‌سازی الکتروودهای ESR از نظر کیفیت فرآیند و عملیات خیلی حساس نیست، زیرا اکسیدهای سطح الکتروود به سرباره منتقل می‌شوند. به همین خاطر سطح الکتروودهای ESR سنگ‌زنی نمی‌شوند، به استثناء مواردی که در آن استفاده کننده نهایی طبق مشخصات خود و برای اطمینان از عدم وارد شدن آلودگی آهن ناشی از قالبهای ریخته‌گری الکتروود، درخواست سنگ‌زنی سطح الکتروودها را کرده باشد. همچنین مک‌های سر شمش مشکلی به بار نمی‌آورند و می‌توان شمش را از طرف سر آن ذوب نمود. بنابراین الکتروودهای ESR همواره با فرآیند VIM تولید نمی‌شوند و نیاز به برش ابتدای آنها نیست. میله رابط در بیرون کوره به الکتروود جوشکاری می‌شود. میله رابط اغلب به شکل لوله است. الکتروود در داخل بوتۀ قرار می‌گیرد، و به سقف کوره متصل می‌شود. از حرکت در صفحه X-Y برای استقرار الکتروود در مرکز بوتۀ استفاده می‌شود.

در اینجا دو روش برای شروع عملیات ذوب وجود دارد. شروع سرد و شروع گرم. در شروع سرد، سرباره و ذرات ریزی از آلیاژ (معمولاً براده‌های ماشین‌کاری) در روی صفحه شروع قرار داده می‌شود. الکتروود به داخل مخلوط سرباره و فلز رانده شده و سپس عقب کشیده می‌شود، تا یک قوس ایجاد شود. توان بالای برای ذوب در مرحله شروع به کار گرفته می‌شود. قوس ایجاد شده مخلوط سرباره و براده‌های آلیاژ را ذوب می‌کند. در این موقع سر الکتروود پایین آورده شده و در داخل سرباره غوطه‌ور می‌شود. از این به بعد ذوب الکتروود توسط سرباره صورت می‌گیرد. همچنین توان الکتريکی شروع ذوب باید بالا باشد تا از جوش خوردن (ذوب شدن و چسبیدن) صفحه شروع کننده به شمش جوانه زده اطمینان حاصل شود. این موضوع از این نظر اهمیت دارد که انتقال جریان الکتريکی از الکتروود به سرباره و سپس به شمش و پس از آن به صفحه آغازین و در نهایت به پایین صورت می‌گیرد.

در شروع گرم، سرباره در بیرون کوره توسط قوس در بوته گرافیتی ذوب می‌شود. سپس سرباره از طریق یک سوراخ در کف بوته به آن وارد می‌شود. الکتروود پایین آورده می‌شود و در سرباره مذاب غوطه‌ور می‌شود و ذوب شدن آغاز می‌گردد. اگر چه توان الکتریکی بالایی برای ذوب شدن مورد نیاز نیست، ولی در آغاز برای اطمینان از ذوب شدن شمش جوانه زده و صفحه آغازین و انتقال الکتریکی کامل، از توان بالا استفاده می‌شود.

همانند فرآیند VAR، استفاده از توان بالا در شروع عملیات ذوب از نظر برقراری تعادل در انتقال حرارت توسط پایه و ایجاد شرایط پایدار ذوب در لحظات شروع فرآیند ذوب، مفید است.

۴-۷-۳- کنترل ذوب مجدد با سرباره الکتریکی

سه متغیر اصلی تعریف کننده یک فرآیند ذوب عبارتند از:

- قطر شمش و الکتروود (مانند فرآیند VAR).

- عمق غوطه‌وری الکتروود در سرباره.

- سرعت ذوب (نرخ ذوب).

انتخاب قطر شمش و الکتروود مقدار لقی بین بوته و الکتروود را تعریف می‌کند. در فرآیند شروع با سرباره سرد که در آن ممکن است مخلوط سرباره-براده به هوا برخاسته و در فاصله لقی آویزان شوند، به لقی ناکافی عموماً به عنوان یک مشکل نگاه می‌شود. ولی یک لقی بسته ممکن است نتیجه‌اش توزیع حرارتی یکنواخت‌تر در سطح مذاب باشد. در این مورد اطلاعات منتشر شده‌ای برای اثبات این ادعا وجود ندارد، از این رو مقدار لقی بیشتر از VAR است.

عموماً فکر می‌شود غوطه‌وری الکتروود، عمق نفوذ الکتروود در داخل سرباره است. روش تعریف شده‌ای برای اندازه‌گیری مقدار غوطه‌وری وجود ندارد، ولی طبق مشاهدات تجربی پیشنهاد شده است که این مقدار بیش از ۶۰۴ میلی‌متر نباشد. درجه غوطه‌وری بر کیفیت شمش تولید شده تاثیر دارد ESR یک فرآیند با جریان AC است و غوطه‌وری الکتروود به علاوه ضخامت پوشش سرباره را می‌توان به عنوان مقاومت این جریان در نظر گرفت (امپدانس). تغییر وزن سرباره در سیستم یا تغییر ترکیب شیمیایی آن، امپدانس مدار و نیز آمپراژ و ولتاژ مورد نیاز برای برقراری توان ورودی داده شده (در یک ساعت ذوب ثابت) را تغییر می‌دهد. ضخامت پوشش سرباره تعیین کننده اصلی است و میزان غوطه‌وری الکتروود ۱۰ تا ۲۰ درصد امپدانس را تشکیل می‌دهد. اندازه‌گیری تغییرات این مقاومت یا تغییرات ولتاژ مربوط به آن می‌تواند برای کنترل غوطه‌وری الکتروود در سرباره مذاب مورد استفاده قرار گیرد. سرعت ذوب الکتروود متغیر مهم دیگری است که کنترل می‌شود. سرعت ذوب به جریان الکتریکی ذوب بستگی دارد ولی بعضی از فرآیندهای VAR در جریان ثابت انجام می‌گیرند، تا سرعت ذوب بهتر کنترل شود. متغیر بعدی در ESR که کیفیت ذوب را کنترل می‌کند، انتخاب نوع و حجم سرباره مورد استفاده است. مقاومت پوشش سرباره مذاب به مقاومت سرباره و ضخامت

پوشش سرباره که جریان الکتریکی از میان آن باید عبور کند، وابسته است. مقاومت سرباره با واکنشهایی که سرباره با فلز مذاب می‌دهد نیز تغییر می‌کند.

یادآوری می‌گردد که تغییرات ولتاژ در اثر تغییرات آمپراژ است. مانند فرآیند VAR اگر در انتهای ذوب شدن، الکتروود کاملاً مصرف شده باشد، یا توان به یکباره قطع شده باشد، مک‌های انقباضی ایجاد شده که گاه طول آن به چندین سانتی‌متر می‌رسد، منجمد خواهد شد. این مک‌ها باید در مرحله بعدی عملیات تولید حذف شوند. برای کم کردن مقدار ماده‌ای که باید بریده و دور انداخته شود، بهتر است در انتها مرحله ذوب قبل از اینکه الکتروود تمام شود، جریان الکتریکی به تدریج کاهش داده شود، تا اینکه جریان کاملاً قطع گردد، در این صورت مک‌های انقباضی تشکیل نمی‌شوند. در این روش حدود ۲۵ میلی‌متر از الکتروود ذوب نمی‌شود.

۴- انتخاب سرباره

همه سرباره‌های ESR دارای CaF_2 هستند. اکسیدها ممکن است برای افزایش مقاومت الکتریکی (ایجاد سهولت در ذوب فلز) و یا برای اصلاح ترکیب شیمیایی ذوب به واسطه واکنشهایی که بین آنها می‌تواند صورت گیرد، به سرباره اضافه شوند. روش نامگذاری ترکیب سرباره به این صورت است، که درصد اجزاء تشکیل دهنده آن را به صورت متوالی کنار هم می‌نویسند مانند: $\text{CaF}_2/\text{MgF}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CuO}/\text{MgO}$. یک سرباره با ترکیب پایه Al_2O_3 ۲۰٪ و CuO ۲۰٪ و CaF_2 ۶۰٪ را به صورت ۶۰٪ / ۲۰٪ / ۲۰٪ نیز می‌توان نوشت. متاسفانه این سیستم به ندرت در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد و نامگذاری فوق به صورت ۶۰/۲۰/۲۰، به کار می‌رود. Ti و Zr عناصر آلیاژی هستند که اغلب در طی فرآیند ESR با سرباره واکنش می‌دهند و به سرباره منتقل می‌شوند. برای ممانعت از تلف شدن این عناصر در سرباره در طی ذوب، به این سرباره‌ها افزودنی TiO_2 و ZrO_2 اضافه می‌شود. تلف شدن به واسطه اکسید شدن عنصر فلزی و منتقل شدن به سرباره صورت می‌گیرد. مشکل عمومی سوپرالیاژهای دارای تیتانیوم این است که سرباره ساز CaF_2 تجاری است و حاوی SiO_2 است. در طی فرآیند ESR، SiO_2 به Si احیاء می‌شود و به مذاب منتقل می‌شود. Ti نیز اکسید شده و به TiO_2 تبدیل شده و به سرباره می‌رود. در نتیجه مقدار Ti مذاب کاهش می‌یابد. این پدیده یک شیب غلظتی Ti در شمش به وجود می‌آورد، زیرا SiO_2 در همان اول کار مصرف می‌شود. وقتی که از سرباره ESR مجدداً در فرآیند ذوب استفاده می‌شود، به خاطر اینکه قبلاً SiO_2 آن به مصرف رسیده، واکنش فوق اتفاق نمی‌افتد. سرباره همواره سعی دارد با فلزات مذاب در دمای سرباره به تعادل شیمیایی برسد. لذا در صورت استفاده مکرر از یک سرباره برای یک ترکیب شیمیایی ثابت، سرباره‌هایی ایجاد می‌شوند که نسبت به افت عناصر ذوب به صورت خنثی در می‌آیند و در افت عناصر تاثیر نمی‌گذارد. متاسفانه افت سرباره (به صورت پوسته‌ای از سرباره بر روی الکتروود در طی فرآیند) عموماً مانع

بازیابی ۱۰۰٪ سرباره می‌شود و به همین لحاظ همیشه مقداری سرباره تازه برای فرآیند ESR مورد نیاز است.

۴-۸- محصولات ذوب سه مرحله‌ای

۴-۸-۱- تعدادی از تولید کنندگان قطعات چرخاندن بحرانی در صنعت توربین گاز، استفاده از یک فرآیند ذوب دو مرحله‌ای را پذیرفته‌اند ذوب اولیه با فرآیند VIM که با الکتروود کم اکسیژن و ترکیب شیمیایی دقیق و به دنبال آن ذوب مجدد یا فرآیند ESR انجام می‌شود. الکتروود ESR تمیز و سالم بوده و ساختار عاری از جدایش نهایی با استفاده از فرآیند ذوب سوم و با ذوب شمش ESR به روش VAR به دست می‌آید.

۴-۸-۲- فرآیند ذوب سه مرحله‌ای شمش

شمش ESR (گاهی با علامت Ingode نشان داده می‌شود زیرا شمش‌ی است که در ذوب مجدد به عنوان الکتروود به کار می‌رود). می‌تواند به یکی از دو روش زیر ذوب شود. مستقیم‌ترین فرآیند، یک فرآیند ذوب سه مرحله‌ای است. این فرآیند (ذوب- ذوب- ذوب) نیازمند افزایش اندازه الکتروود از VIM به ESR و سپس به VAR است. به همین خاطر قطر VAR طوری انتخاب می‌شود که ساختار عاری از جدایش مثبت به دست آید. به عنوان نمونه برای آلیاژ ۷۱۸IN- اندازه‌های متوالی قطر شمش فرآیندهای VAR- ESR-VIM به ترتیب می‌تواند ۳۵/۶-۴۳/۲-۵۰/۸ سانتی‌متر باشد. وزن یک الکتروود فرآیند نهایی VAR می‌تواند ۲۹۵۰ کیلوگرم باشد.

اگر یک الکتروود با قطر بزرگتر (با وزن ۴۹۵۰ کیلوگرم) استفاده شود، شمش‌های ESR بزرگترین باید به دست آید. برای به دست آوردن قطر مورد نظر شمش برای فرآیند VAR شمش ESR با قطر بزرگتر آهنگری شده و اندازه مورد نظر به دست می‌آید، سپس سنگ زنی شده، پوسته‌های اکسیدی و آهنگری آن زدوده شده و انتهای آن برشکاری می‌شود. این فرآیند که ذوب- ذوب- آهنگری- ذوب نامیده می‌شود، دارای قطرهای پس از ESR, VIM آهنگری و VAR یعنی ۴۳/۲، ۵۰/۸، ۴۳/۲، ۵۰/۸ سانتی‌متر است. انجام فرآیند ذوب - ذوب - آهنگری- ذوب نیازمند زمان است. اما می‌توان با استفاده از شمش‌های بزرگتر، راندمان تولید بالاتری به دست آورد. همچنین قطعات خیلی بزرگ که نیازمند مواد اولیه ورودی زیادی هستند، تنها با فرآیند ذوب - ذوب- آهنگری- ذوب قابل دستیابی هستند. شمش- الکتروود سالم و تمیز (به دست آمده از فرآیند قبلی) به وسیله VAR ذوب مجدد می‌شود.

تمیزی و بی‌عیبی بهبود یافته الکتروود، کنترل فرآیند VAR را آسان می‌سازد. محصولات ذوب سه مرحله‌ای نسبت به محصولات ذوب‌های دو مرحله‌ای VIM+VAR دارای نقاط آلوده سفید کمتری هستند. همچنین سالم بودن الکتروود در قطرهای بزرگتر، کنترل عدم تشکیل جدایش مثبت را تسهیل می‌سازد. ولی

حتی در ذوب‌های سه مرحله‌ای نیز نقاط سفید آلوده دیده می‌شوند و وجود آنها باید در طراحی قطعه در نظر گرفته شود.

۴-۹- تبدیل شمش و محصولات نورد

۴-۹-۱- عملیات کارگرم اولیه با تبدیل شمش ریخته به محصول نوردی صورت می‌گیرد. محصولات نوردی به دو گروه تقسیم می‌شوند: محصولات طویل شمشال‌ها و میله‌ها و محصولات تخت (ورق و صفحه).

در نتیجه فرآیند ذوب در همه سوپرآلیاژها، جدایش در درجات مختلف بوجود خواهد آمد. ترکیب‌های شیمیایی می‌توانند در اثر قرار گرفتن در معرض دمای بالای فرآیند کارگر، به سادگی همگن شوند. ترکیب‌های شیمیایی پیچیده‌تر ممکن است برای از بین رفتن شیب‌های غلظتی به وجود آمده در شمش، به دماهای بالاتر و زمان‌های طولانی‌تر قبل از کارگرم، نیاز داشته باشند.

عملیات اصلی استفاده شده برای تبدیل شمش عبارتند از: آهنگری، نورد و اکستروژن. اکستروژن با آهنگری و نورد تفاوت دارد، زیرا در آن تمام تغییر شکل در یک عبور اتفاق می‌افتد. در فرآیند کار بر روی سوپرآلیاژها تعدادی از سیکل‌های حرارتی - مکانیکی مانند گرم کردن و تغییر شکل اتفاق می‌افتد. علاوه بر این ممکن است حالت‌دهی میان شمش نیز مورد نیاز باشد. به خاطر اینکه سوپرآلیاژها به پیشینه فرآیند حساس هستند، سیکل‌های حرارتی - مکانیکی می‌توانند، اثر مهمی برخواص نهایی قطعه آلیاژی داشته باشند. مراحل نهایی فرآیند (آهنگری یا نورد و عملیات حرارتی بعدی) پس از تبدیل مقطع شمش، به وجود آوردگان اولیه ساختار و خواص هستند. ولی همه مراحل حرکت از شمش تا محصول کار شده نهایی، در نتایج بدست آمده مشارکت دارند.

بعضی از محصولات نورد شده به ویژه محصولات طویل ممکن است برای شکل دادن آنها به صورت قطعه نهایی بعداً تحت کارگرم قرار گیرند (معمولاً آهنگری). به خاطر عواملی نظیر دمای پایین آهنگری، تغییر شکل غیر همگن، تبرید قالب، اصطکاک و غیره ریز ساختار آهنگری شده در مناطقی می‌تواند، دارای ریز ساختار باقیمانده از مراحل قبل باشد. آهنگری هم دما (فوق مومسان) در به حداقل رساندن بعضی از اثرات مفید است. ولی با اهمیت پیدا کردن خواص خستگی برای قطعات آهنگری شده، اندازه دانه محدود شده، یکنواختی ریز ساختار و الزامات کیفی وضع شده‌اند. این خواسته‌ها گاهی با مشخصات و گاهی به وسیله توافقات بین سازنده و مشتری انجام می‌گیرد. بهبودهای زیادی که در فن‌آوری ذوب و استفاده از تجهیزات کنترل اتوماتیک تبدیل شمش و کنترل اندازه دانه انجام شده است، ریز ساختار و کیفیت را در شمشال یا محصول نورد تولید شده از شمش ارتقاء داده است. علاوه بر کنترل‌های ساختار داخلی یک شمش یا شمشال، در طی تبدیل مقطع، بهبود کیفیت سطح تمام شده جهت ایجاد شرایط مناسب برای بازرسی صوتی صورت گرفته است.

۴-۹-۲- همگن سازی توزیع عنصر محلول در شمش‌ها

مشکل توزیع غیر یکنواخت عنصر محلول در نواحی بین دندریتی شمش‌های ریخته، باید در طی فرآیند تبدیل شکل در نظر گرفته شود. برای آلیاژهای دارای عنصر محلول کم مراحل حرارت دادن استفاده شده در تبدیل شمش ریخته به محصول کار شده، یک ساختار نسبتاً یکنواخت (از نظر شیمیایی) ایجاد خواهد کرد. ولی برای مواد پر آلیاژ مانند U-۷۱۸IN-۷۲۰, Waspaloy و زمانهای طولانی‌تر و دماهای بالاتر از دمای آهنگری برای همگن کردن محصول ریخته مورد نیاز است. در بعضی از آلیاژها این دماها ممکن است از دمای ذوب بعضی از نواحی بین دندریتی بیشتر باشد دماهای همگن سازی 1204°C غیر معمول نیستند، در حالی که زمان‌های مربوط به این دماها گاهی به چهار روز می‌رسد.

علی‌رغم زمان‌های طولی‌المدت و دماهای بالا ممکن است بعضی از شیب‌های غلظتی محلول حذف نشوند. اختلاف بین مقادیر حداقل و حداکثر نیوبیوم ۰/۷٪ است. در ترکیب‌های شیمیایی کار شده، مقدار کربن عموماً از آنچه که در همان آلیاژ با ریخته‌گری دقیق یافت می‌شود، خیلی پایین‌تر است. بنابراین ساختار شمش ریخته برای آلیاژ کار شده دارای کاربیدهای قابل توجهی نیست. کربن در نواحی بین دندریتی متمرکز شده و در طی عملیات همگن‌سازی به کاربیدها تبدیل می‌شود. دمایی که در آن کاربیدها تشکیل می‌شوند عامل اولیه‌ای برای کنترل اندازه کاربید است. در معرض دماهای خیلی بالا و زمان‌های طولانی بعدی قرار گرفتن ممکن است کاربیدها را درشت کند. اما کاربیدهای درشت و خشن تا وقتی که دمای آلیاژ به نزدیکترین نقطه ذوب نرسد، دیده نمی‌شوند. ناحیه تشکیل کاربیدها همان ناحیه تشکیل دهنده بین دندریتی است. بنابراین تا کار بعدی کاربیدها به صورت تیغه‌های موضعی که در آن فاصله بین تیغه‌ها نشان دهنده، فاصله بین دندریتها است، ظاهر می‌شوند.

دومین پدیده‌ای که باید به آن توجه کرد و در طی همگن سازی اتفاق می‌افتد، پیدایش مک در شمش است. خیلی از سوپرآلیاژها اثرات کرکندال قوی (اتمهای عناصر با سرعت‌های مختلفی حرکت می‌کنند و حفره‌های اندازه اتمی پشت سر گذاشته شده می‌توانند با هم پیوند شوند). را بین ناحیه دندریتی و زمینه دندریتی نشان می‌دهند. بنابراین شمش‌های همگن شده نوعاً سطح بالایی از مک دارند. کار مکانیکی این شمش‌ها باید به حد کافی باشد، تا مک‌ها بسته شوند. تغییر شکل ناکافی یا تشکیل ناحیه مرده در طی تبدیل شکل، می‌تواند باقی مانده موجود در محصولات نوردی را به وجود آورد.

۴-۹-۳- آهنگری محصول نیمه تمام

تبدیل شکل چند مرحله‌ای شمش‌ها، به سطح مقطع‌های کوچکتر یا با طول بیشتر آهنگری محصول نیمه تمام نامیده می‌شود. آهنگی محصول نیمه تمام در برگیرنده کارگرم بر روی شمش با پرس‌های آهنگری بزرگ است (نورد ممکن است برای همان کار استفاده شود ولی در اصطلاح فنی به آن نورد شمشه گفته می‌شود). هدف عملیات آهنگری محصول نیمه تمام خرد کردن ریز ساختار ریخته به وسیله کار و حرارت

دادن چند مرحله‌ای ماده می‌باشد. فرآیند آهنگری محصول نیمه تمام ساختار دانه را ریز می‌کند. در سال‌های اخیر نیاز به افزایش قابلیت بازرسی شمشال‌ها و میله‌ها موجب شده که کنترل اندازه دانه در شمش و شمشال صورت گیرد. برای عملیات نورد یا آهنگری بعدی گفته شده است که آهنگری محصول نیمه تمام با فرآیندهای آهنگری شعاعی مانند آهنگری دوار شباهت‌هایی دارد، ولی شمش‌های آهنگری محصول نیمه تمام با شمش‌های آهنگری شعاعی تفاوت دارند. چند نکته در ارتباط با فرآیند آهنگری محصول نیمه تمام وجود دارد:

- پرس باید ظرفیت کافی و سرعت ایجاد نیروی آهنگری محصول نیمه تمام مورد نیاز در زمان هر چه کوتاه‌تر، برای به حداقل رساندن سطح تماس تبرید شده را داشته باشد. نیروی ایجاد شده باید برای ایجاد کرنش در داخل شمش کافی باشد.

- شعاع قالب آهنگری باید برای جلوگیری از نیاز به سنگ‌زنی بعدی کاملاً طراحی شده باشد.

- چنانچه نمی‌توان محصول گرد تولید کرد، آهنگری نیمه تمام چهارگوش مربع مستطیلی مطلوب است.

- قالب‌هایی از سوپرآلیاژهای استحکام بالا، برای به حداقل رساندن سایش ابزار ارجحیت دارند.

- استفاده از اتوماسیون بسیار مطلوب است.

به آهنگری محصول نیمه تمام شمشال، به ویژه با در نظر گرفتن مدل‌سازی فرآیند توجه زیادی می‌شود. ولی مقالات موجود درباره آهنگری محصول نیمه تمام (اکستروژن، نورد، کشش سیم و ...) سوپرآلیاژها خیلی محدود است.

۴-۹-۴- آهنگری محصول نیمه تمام آلیاژ ۷۱۸IN

آلیاژ ۷۱۸IN یک سوپرآلیاژ پایه نیکل استحکام بالا است که در دماهای متوسط استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، این آلیاژ پرکاربردترین سوپرآلیاژ است و استفاده‌هایی در توربین‌های گاز هواپیماهای نظامی و تجاری، توربین‌های گاز زمینی و قطعات موتورهای شاتل‌های فضایی دارد.

عموماً ریز ساختار ریخته همگن‌سازی شده شامل دانه‌های خیلی درشت است که باید به ساختار دانه ریز یکنواخت شکسته شود. آهنگری محصول نیمه تمام فرآیندی است که روی وجوه شمش چهار گوش انجام گرفته و در طول شمش چند بار پرس کوتاه صورت می‌گیرد تا کرنش مورد نیاز به آن اعمال شود. در هر بار پرس، قطر شمش به طور موضعی کاهش می‌یابد.

در مقاطع بزرگ شمش‌های امروزی که در حدود 2 cm ۱۹۳۵ یا بیشتر است، به سختی می‌توان در هر بار پرس کوتاه کرنش لازم را در شمش بوجود آورد. وقتی که کل طول شمش تحت کار قرار گرفت، فرآیند باید دوباره تکرار شود و این کار تا رسیدن به اندازه نهایی و ساختار ریز دانه انجام می‌شود. بنابراین همانگونه که قبلاً اشاره شد، آهنگری محصول نیمه تمام آلیاژ ۷۱۸IN با آهنگری فشاری شروع شده و با گرم کردن مجدد برای مرحله بعد آهنگری خاتمه می‌یابد. دمای کوره برای آهنگری محصول نیمه تمام با کاهش اندازه

مقطع تغییر می‌کند. ابتدا کوره در دمای 1121°C قرار داده می‌شود، ولی با کاهش سطح مقطع، دمای کوره تا زیر دمای انحلال فاز که تقریباً 1010°C است، پایین آورده می‌شود. این کاهش دما اجازه می‌دهد که فازهای کروی در مرز دانه‌ها شکل بگیرد و از رشد دانه‌ها در طی عملیات آهنگری محصول نیمه تمام جلوگیری کند. عملیات آهنگری محصول نیمه تمام نهایی، گرد کردن لبه‌های محصول آهنگری شده و ماشین‌کاری (پوسته کنی) محصول نیمه تمام برای تولید شکل مناسب جهت بازرسی با امواج فراصوت است.

۴-۹-۵- اکستروژن

اکستروژن برای فشردن پودرها استفاده شده است و اکثر قطعات متالورژی پودر از شمشال‌های اکستروژن شده شروع می‌شوند. اکستروژن برای تولید لوله‌های بی‌درز نیز استفاده شده است. اکستروژن زمانی در آلیاژهایی نظیر Astroloy برای تبدیل شمش به شمشال استفاده شد.

اکستروژن می‌تواند از روش‌های جدید برای مدل‌سازی استفاده کند. از اکستروژن می‌توان برای تولید اشکال محصول مشابه به مقاطع نورد مانند میله استفاده کرد. اکستروژن آلیاژهایی نظیر $U-700$ با قرار دادن شمش در یک محفظه فولادی زنگ‌نزن شروع می‌شود. این مرحله ممکن است به ممانعت از تبرید سطح شمش در اثر تماس با دیواره محفظه و سطح قالب و ایجاد ترک ناشی از آن نیاز داشته باشد. اگر از آلیاژی با دامنه کار گرم گسترده‌تر از $U-700$ استفاده می‌شود ممکن است قرار دادن در محفظه مورد نیاز نباشد، ولی به قالب ویژه‌ای نیاز است. روغن‌کاری کافی باید در تمام موارد صورت گیرد و یک پرس اکستروژن فشار بالا باید وجود داشته باشد. میله اکستروژن شده ممکن است برای تولید پره‌های هوای توربین کار شده استفاده شود اما اکنون اکثر قطعات پره هوا در ناحیه داغ به صورت ریخته هستند.

۴-۹-۶- نورد

سوپرآلیاژها به ویژه سوپرآلیاژهای نیکل مشکل‌ترین مواد برای نورد کردن هستند. نورد اولیه این مواد معمولاً در دمایی نزدیک به نقطه ذوب انجام می‌شود و بسیاری از نوردهای خشن طوری طراحی شده‌اند که تنش زیادی در طی کارگرم به این آلیاژها اعمال می‌شود. سوپرآلیاژهای پایه نیکل دارای محدوده دمایی کارگرم کوچکی هستند. محصولات نورد شامل میله، ورق و اشکال هستند. زمانی از میله‌ها برای پره‌های هوای ناحیه داغ توربین‌های گاز استفاده می‌شد. به عنوان مثال آلیاژ $U-700$ در شکل کار شده برای بعضی از قطعات استفاده شده است. شکل دادن با نورد یا آهنگری آلیاژها در تولید تیغه‌ها به کار گرفته شده است. بعضی از آلیاژهای استحکام بالا مانند $B-1910$ (نوع کار شده - $B-1900$) به طور موفقی به صورت تیغه‌ها به کار برده شدند، اما بعداً از آنها به صورت ریخته در پره‌های هوا توربین پر فشار استفاده شد.

ورق‌ها و محصولات نیمه تمام دیگر مانند مقاطع گرد، چهارگوش و میله‌های شکل دار به وسیله نورد تولید شده‌اند. چندبار حرارت دادن و آماده سازی سطح ممکن است نیاز باشد. محصولات به شکل ورق استفاده‌هایی در توربین‌های گاز پیدا کرده‌اند که در آنها به شکل‌پذیری و مقاومت اکسیداسیون دما بالا و

