

MATERIALWORLD

کانال دنیای مواد ارائه دهنده برترین
جزوات و کتب زبان اصلی و مقالات و
آخرین اخبار

مهندسی مواد

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

گروه متالورژی و مواد

جزوه درس مواد پیشرفته

مدرس: رضا آبدیده

MATERIAL-WORLD

زمستان ۱۳۹۶

فصل اول

مقدمه :

کامپوزیت بصورت زیر تعریف می‌شود: ماده‌ای اطلاق می‌شود که از دو فاز ماتریس و تقویت کننده تشکیل شده باشد و از فاز دوم حداقل به اندازه ۵ درصد استفاده شده باشد. به ترکیب ماتریس با الیاف (یا ماده تقویت کننده) زیر ۵ درصد کامپوزیت گفته می‌شود.

➤ کامپوزیت به موادی گفته می‌شود که از یک فاز زمینه و یک تقویت کننده تشکیل شده باشند.

➤ تعریف انجمن متالورژی آمریکا : به ترکیب ماکروسکوپی دو یا چند ماده مجزا که سطح مشترک مشخصی بین آنها وجود داشته باشد، کامپوزیت گفته می‌شود.

کامپوزیت از دو قسمت اصلی ماتریس و تقویت کننده تشکیل شده است. ماتریس با احاطه کردن تقویت کننده آن را در محل نسبی خودش نگه می‌دارد. تقویت کننده موجب بهبود خواص مکانیکی ساختار می‌گردد. به طور کلی تقویت کننده می‌تواند به صورت فیبرهای کوتاه و یا بلند و پیوسته باشد

دسته‌بندی کامپوزیت‌ها از دیدگاه زیستی :

(۱) کامپوزیت‌های طبیعی. مانند استخوان، ماهیچه، چوب و...

(۲) کامپوزیت‌های مصنوعی (مهندسی)

دسته‌بندی کامپوزیت‌های مهندسی از لحاظ فاز زمینه :

(۱) کامپوزیت‌های با زمینه سرامیکی (CMC)

(۲) کامپوزیت‌های با زمینه پلیمری (PMC)

(۳) کامپوزیت‌های با زمینه فلزی (MMC)

دسته‌بندی کامپوزیت‌ها از لحاظ نوع تقویت کننده :

(۱) کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر (FRC)

(۲) کامپوزیت‌های تقویت شده توسط ذرات (PRC)

کامپوزیت‌های سبز (کامپوزیت‌های زیست تجزیه پذیر) :

در اینگونه کامپوزیت‌ها، فاز زمینه و تقویت کننده، از موادی که در طبیعت تجزیه می‌شوند، ساخته می‌شوند. در کامپوزیت‌های سبز، معمولاً فاز زمینه از پلیمرهای سنتزی قابل جذب بیولوژیکی و تقویت کننده‌ها از فیبرهای گیاهی ساخته می‌شوند.

مراحل طراحی کامپوزیت ها :

(۱) گرد آوری اطلاعات در خصوص کاربرد قطعه (نیروهای استاتیک، دینامیک و شرایط محیطی)

(۲) مشخصات اولیه قطعه (مواد، ابعاد و چیدمان لایه‌ها)

(۳) زمان و هزینه

(۴) بررسی روش‌های محاسباتی (تحلیل و عددی)

(۵) شناسایی روش‌های ساخت

(۶) نحوه مونتاژ (روش‌های اتصال قطعات)

بهینه‌سازی (وزن کم، استحکام بالا و هزینه پایین)

مزایای کامپوزیت ها :

مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی آن است که با توجه به نیازها، می‌توان خواص آنها را کنترل کرد. به طور

کلی مواد کامپوزیتی دارای مزایای زیر هستند :

- مقاومت مکانیکی بالا نسبت به وزن
- مقاومت بالا در برابر خوردگی
- خصوصیات خستگی عالی نسبت به فلزات
- خواص عایق حرارتی خوب
- به دلیل صلبیت بیشتر، تحت یک بارگذاری معین، خیز کمتری (بعضاً ده‌ها برابر کمتر) نسبت به فلزات دارند.
- استحکام بالا
- نسبت حجم به وزن کم

➤ سبک بودن پاهی تا چندین برابر مستحکم تر از فولاد با وزنی با چندین برابر کمتر

انواع نانو کامپوزیت :

- (۱) نانو کامپوزیت های پلیمری
- (۲) نانو کامپوزیت های سرامیکی
- (۳) نانو کامپوزیت های سرامیک - فلز
- (۴) نانو کامپوزیت های زمینه فلزی

کاربردها :

فایبر گلاس یکی از پرکاربردترین کامپوزیت هاست. فایبرگلاس یک کامپوزیت با زمینه پلیمری است که توسط فیبرهای شیشه تقویت شده است. در ساخت بدنه جنگنده‌های رادار گریز از کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. همچنین در ساخت قطعات هواپیما و پره نیروگاه بادی و پره هلیکوپتر از کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. بطور کلی مواد کامپوزیتی (مواد مرکب) به دلیل داشتن جرم بسیار کم و مقاومت بالا نسبت به فلزات، در صنعت هوا و فضا کاربرد وسیعی دارند. هم چنین کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی از نوع کامپوزیت های استحکام بالا هستند که در صنایع نظامی کاربرد دارند.

سختی کامپوزیت‌های تک جهته :

سختی کامپوزیت‌های تک جهته مانند دیگر مواد سازه‌ای می‌تواند توسط روابط مناسب و صحیح تعیین شود. ضرایب یا ثوابت این روابط، می‌تواند در یک دستگاه ثوابت مهندسی یا کامپلیانس یا مدول‌های جزئی جمع آوری شود. مقادیر هر یک از دستگاهها می‌تواند مستقیماً توسط ترمهای مقادیر دیگر دستگاهها تعریف شود. سختی کامپوزیت‌های تک جهته توسط همان روابط تنش-کرنش که در مواد سنتی مهندسی موجود است، محاسبه می‌شود. جز آنکه تنها تعداد ثوابت مستقل در کامپوزیت‌ها چهار عدد است.

سه مرحله از تنش روی کامپوزیت‌ها وجود دارد :

- میکرومکانیکال یا تنش منطقه ای که همان محاسبه بر اساس تفاوت‌های موجود میان فازهای پیوسته الیاف، ماتریس و در برخی از موارد فصل مشترک تقویت کننده و ماتریس حباب‌های هواست.
 - تنش لایه‌ای که محاسبه بر اساس همگن انگاشتن هر لایه مجزا یا گروهی از لایه هاست. به این ترتیب که الیاف و ماتریس طوری آمیخته‌اند که دیگر فاز مجزایی وجود ندارد.
 - برآیند تنش یک لامینیت N یا برآیند ممان یک لامینیت M عبارتست از متوسط تنش لایه‌ها در ضخامت آن لامینیت.
- به هنگام کار کردن با کامپوزیت‌ها باید به علائم توجه تام شود. چراکه اختلاف بین مقاومت‌های فشاری و کششی ممکن است چند صد در صد باشد. به علاوه اختلاف بیشتری میان مقاومت‌های برشی منفی و مثبت وجود دارد. علی‌رغم مواد سنتی که علائم در آنها از اهمیت کمی برخوردار است، در کامپوزیت‌ها اشتباه در علائم، نتایج وخیمی دربر خواهد داشت.
- سه دستگاه از ثوابت مواد وجود دارد که هر یک به تنهایی می‌تواند بطور کامل سختی کامپوزیت‌های تک‌جهته روی محوری را روشن کنند. ویژگی این دستگاهها عبارتند از:
- مدول‌ها جهت بدست آوردن تنش از کرنش بکار برده شده‌است. این اساسی ترین دستگاهی است که برای سختی لامینیت‌های چند جهته مورد نیاز است.
 - کامپلیانس‌ها جهت محاسبه کرنش از روی تنش بکار می‌رود. این دستگاهی است که جهت محاسبه ثوابت مهندسی مورد نیاز است. این دستگاه جهت بدست آوردن سختی لامینیت‌های چند جهته مورد نیاز نمی‌باشد.
 - ثوابت مهندسی از آثار مواد سنتی است. و طراحان سنتی در کار کردن با ثوابت مهندسی احساس راحتی بیشتری می‌کنند. می‌توان از یک دستگاه ثوابت، دستگاه دیگری را یافت. و همه در عین حال معادل یکدیگرند. یک رابطه مستقیم میان مدول‌ها و کامپلیانس‌های جزئی وجود دارد. و هر یکی برگردان دیگری است.

فاز زمینه :

➤ فاز زمینه کامپوزیت های رشته ای می تواند فلز ، پلیمر یا سرامیک باشد . معمولا از فلزات یا پلیمرها به عنوان ماده زمینه استفاده می شود زیرا انعطاف پذیری مطلوبی دارند . در کامپوزیت های زمینه سرامیکی جز تقویت کننده برای بهبود چقرمگی شکست استفاده می شود . در انتخاب ترکیب زمینه -رشته ، مهمترین عامل استحکام پیوند است [۱].

دسته بندی کامپوزیت های مهندسی از لحاظ فاز زمینه :

(۱) کامپوزیت های با زمینه سرامیکی (CMC) :

بدلیل مقاومت آلی در برابر اکسایش در دمای بالا ، با وجود احتمال شکست ترد ، بهترین گزینه برای استفاده در دمای بالا و تنش های شدید است . به ویژه در قطعات موتور خودرو و توربین های گازی هواپیما چقرمگی شکست این کامپوزیت ها معمول است در حالی که در اغلب فلزات ۱۵ است . چقرمگی شکست نسل جدید و توسعه یافته کامپوزیت های زمینه سرامیکی (CMC) که بصورت دزه ای، رشته ای یا ویسکری از مواد سرامیکی است. این بدان دلیل است که ترکی که در زمینه ایجاد می شود توسط ذرات ، رشته ها یا ویسکرها تنها اشاعه نمی یابد بلکه از اشاعه آن ممانعت به عمل می آید.

به این امر کم می کند. کامپوزیت های زمینه سرامیکی را با روش های پرسکاری گرم ، پرسکاری ایزوستاتیک گرم وزینتر کردن فاز مذاب تولید می کند آلومینا های تقویت شده با ویسکرها SiC به عنوان ابزار برش در ماشین کاری آلیاژهای فلزی سخت استفاده می شود

سرامیک های پیشرفته دارای ویژگی های مطلوبی مانند سختی، استحکام بالا، تحمل دماهای بالا، خنثایی شیمیایی، مقاومت در برابر فرسایش و چگالی کم هستند. ولی در برابر بارهای کششی و ضربه ضعیف هستند و بر خلاف فلزات، از خود انعطاف پذیری نشان نمی دهند و مستعد شکست تحت بارهای مکانیکی و شوک حرارتی هستند. اگر مقایسه ای بین سرامیک ها و دیگر مواد داشته باشیم، باید گفت که سرامیک ها تنها گروه از مواد هستند که در دماهای بالا قابل استفاده اند و دارای سختی، استحکام و مدول الاستیک بالاتری از فلزات و پلیمرها می باشند. همچنین چگالی، ضریب انبساط حرارتی و هدایت الکتریکی و حرارتی کمی دارند.

به ویژه چگالی و انبساط حرارتی کم سرامیک‌ها اهمیت زیادی در اغلب کاربردها دارد. که اگر چه نسبت مدول الاستیسیته تقویت کننده و زمینه در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و پلیمری عموماً بین ۱۰ و ۱۰۰ است ولی برای کامپوزیت زمینه سرامیکی، این نسبت معمولاً برابر یک یا کمتر از آن است. نسبت مدول بالا در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و پلیمری، سبب انتقال موثر بار از زمینه به تقویت کننده می‌شود. در حالی که در یک کامپوزیت سرامیکی، زمینه و تقویت کننده در توانایی تحمل بار اختلاف زیادی ندارد؛ به این معنا که هدف از ساخت کامپوزیت سرامیکی، افزایش استحکام نیست. مگر آن‌هایی که زمینه آنها مدول الاستیسیته کمی دارند (مانند زمینه‌های شیشه‌ای).

از حوزه‌های مهم در تهیه کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی انواع گوناگون شیشه، شیشه سرامیک‌ها و سرامیک‌هایی همچون کربن، کاربید سیلیسیوم، نیتريدسیلیسیوم، آلومینات‌ها و اکسیدها. تقویت کننده‌های مورد استفاده عبارتند از کاربیدها، بوریدها، نیتريدها و کربن. کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی تنها کامپوزیت‌هایی هستند که بالای ۹۰۰ درجه سانتیگراد استحکام خود را حفظ می‌کنند.

عمده ترین کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی عبارتند از :

(۱) کامپوزیت‌های کربن/کربن

(۲) کامپوزیت‌های آلومینا SiC

(۳) کامپوزیت‌هایی با زمینه Si_3N_4 یا SiC تقویت شده با الیاف پیوسته SiC و کربن .

معمولاً کاربرد کامپوزیت‌های سرامیکی به دو دسته هوافضایی و غیرهوافضایی تقسیم می‌شوند. در کاربردهای هوافضایی مسأله اصلی، عملکرد کامپوزیت است. در حالی که در کاربردهای غیر هوافضایی عامل قیمت بسیار مهم است.

کامپوزیت‌های سرامیکی با الیاف پیوسته، عموماً دارای خواص مکانیکی ویژه بالایی هستند و می‌توانند در کاربردهای هوافضایی دمای بالا به کار گرفته شوند. کامپوزیت‌های کربن/کربن با پوشش SiC به عنوان محافظ حرارتی در شاتل‌های فضایی استفاده شده است و کامپوزیت‌های کاربید سیلیسیم/کربن مواد مناسبی برای هواپیماها هستند .

۲) کامپوزیت‌های با زمینه پلیمری (PMC) :

کامپوزیت های زمینه پلیمری از یک رزین پلیمری (پلاستیک تقویت شده مولکول درشت) به عنوان زمینه با رشته‌هایی به عنوان عامل تقویت کننده تشکیل شده است . از ویژگیهای این دسته از کامپوزیت ها ، کاربرد متنوع و گسترده ، خواص خوب در دمای محیط ، سهولت ساخت و هزینه کم است . این نوع کامپوزیت ها بر اساس نوع تقویت شدن به شیشه ایی ، کربنی و آرامید تقسیم می شود کامپوزیت های پلیمری رشته شیشه ای شامل رشته های شیشه ایی پیوسته یا ناپیوسته در زمینه پلیمری است در آینده بجای شیشه بیشتر از کربن به عنوان رشته تقویت کننده در کامپوزیت های پلیمری استفاده خواهد شد چون رشته های کربنی بیشترین استحکام ویژه و مدول ویژه را در میان مواد رشته های تقویت کننده دارا هستند . رشته های آرامید موادی با استحکام و مدول بالا هستند که در اوایل دهه ۱۹۷۰ عرضه شدند .

در کامپوزیت های زمینه پلیمری ، غیر از سه نوع رشته تقویت کننده شیشه ایی ، کربنی و آرامید گاه از بور ، کاربید سیلیسیم و اکسید آلومینیم در حد محدودی استفاده می شود رشته های بور در اجزا هواپیماهای نظامی ، تیغه ای پره بالگرد و برخی وسایل ورزشی بکار می رود از رشته کاربید سیلیسیم و آلومینا در راکتها ی تنیس ، مدار چاپی و دماغه مخروطی موشک استفاده می شود.

۳) کامپوزیت‌های با زمینه فلزی (MMC) :

در کامپوزیت های زمینه فلزی عبارت است از یک فلز انعطاف پذیر . برتری های این نوع کامپوزیت نسبت به کامپوزیت های زمینه پلیمری شامل دمای عملکرد بالاتر ، شعله پذیر نبودن و مقاومت بیشتر در برابر تهاجم سیالات آلی است . البته هزینه آنها بیشتر و در نتیجه استفاده از آنها محدود تر است . از سوپر آلیاژها ، آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم ، تیتانیوم و مس به عنوان مواد زمینه استفاده می شود .

مواد تقویت کننده ممکن است به شکل ذرات ، رشته های پیوسته و ناپیوسته و یا ویسکرها باشند که ۱۰ الی ۶۰٪ حجمی کامپوزیت را تشکیل می دهد رشته های پیوسته شامل کربن ، کاربید سیلیسیم ، بور ، آلومینا و



فلزات دیر گداز است رشته های ناپیوسته از ذرات همین مواد تشکیل می شوند از یک جهت می توان سرمت ها را جز این (MMC) ها قرار دارد.

خودرو سازان اخیرا در محصولات خود شروع به استفاده از کامپوزیتهای زمینه فلزی کرده اند به عنوان نمونه برخی قطعات موتور از زمینه آلیاژهای آلومینیم تقویت شده با رشته های آلومینا و کربن تولید شده که سبک وزن تر هستند و مقاومت آنها در برابر سایش و اعوجاج حرارتی بیشتر است استفاده از این نوع کامپوزیت ها در محورهای محرک که سرعت چرخش بالاتر و میزان کمتر سرو صدای ناشی از ارتعاش را به همراه دارد صورت گرفته است . صنایع هوا فضا نیز از این نوع کامپوزیت ها بهره می برد له عنوان نمونه در قطعات تلسکوپ فضائی هابل از رشته های گرافیتی پیوسته استفاده شده است.

دسته بندی کامپوزیت ها از لحاظ نوع تقویت کننده :

۱) کامپوزیت های تقویت شده با فیبر (FRC) :

از لحاظ تکنولوژیکی، مهمترین کامپوزیتها آنها هستند که فاز پراکنده شده به شکل رشته است. کامپوزیتهای رشته ایی تقویت شده استحکام و یا سفتی بالائی دارند . این ویژگی به عنوان عواملی نظیر استحکام ویژه و مدول ویژه بالا می شود دو زیر گروه این دسته از کامپوزیتها بر اساس طول رشته تعیین می شوند . خواص مکانیکی این کامپوزیت ها به خواص رشته و میزان نیروی منتقل شده به رشته از سوی فاز زمینه بستگی دارد .بنابراین طول بحرانی رشته در استحکام دهی و سفت سازی موثر کامپوزیت نقش دارد . خواص مکانیکی این نوع کامپوزیت ها به رفتار تنش - کرنش رشته و فاز زمینه ، درصد حجمی فاز و جهت اعمال نیرو بستگی دارد همسو بودن رشته ها ، رفتار غیر همسو را در خواص به دنبال دارد . در این حالت بسته به جهت طولی اعمال نیرو جهت عرضی و عمود برجهت رشته ها رفتار تنش - کرنش متفاوت خواهد بود . هر چه قطر رشته کوچکتر باشد ، رشته مستحکم تر از ماده زمینه خواهد بود. موادی که بعنوان رشته های تقویت کننده بکار میروند استحکام کششی بالایی دارند.براساس قطر و مشخصه رشته ها به ۳ دسته تقسیم می شوند :ویسکرها ،رشته ها و سیم ها. ویسکر ها تک بلوره های بسیار نازکی هستند که نسبت طول به قطر

آنها فوق العاده زیاد است. آنها مستحکم ترین موادی هستند که شناخته شده اند. مواد ویسکری شامل گرافیت ، کاربید سیلیسیم، نیتريد سيليسيم و اكسيد آلومينيم است .

۲) کامپوزیت های تقویت شده توسط ذرات (PRC) :

فاز پراکنده شده در کامپوزیت های تقویت شده با ذرات هم محور و همسواست ، یعنی ذرات تقریباً در همه جهات همسو هستند . دو زیر دسته این نوع کامپوزیت ها عبارتند از : کامپوزیت های درشت ذره و مستحکم شده به وسیله پراکندگی ذرات . تفاوت این دو گروه به مکانیزم مستحکم شدن یا تقویت شدن بستگی دارد . واژه درشت بدین جهت استفاده می شود که نشان دهد فعل و انفعال بین ذره - زمینه نمی تواند در مقیاس اتمی یا مولکولی صورت گیرد و مکانیک محیط های پیوسته استفاده می شود . در بیشتر این نوع کامپوزیت ها ، فاز پراکنده سخت تر و سفت تر از زمین است این ذرات تقویت شده جابجائی و حرکت فاز زمینه را در مجاور خود و مهار و متوقف می کنند. اساساً زمینه ، مقداری از تنش اعمال شده را به ذرات منقل می کنند . میزان تقویت شدن یا بهبود رفتار مکانیکی به استحکام پیوند در فصل مشترک زمینه - ذره بستگی دارد . در کامپوزیت های مستحکم شده با ذرات پراکنده ، ذرات معمولاً بسیار کوچکتر هستند و اندازه آنها بین ۱۰ nm تا ۱۰۰ nm است. فعل و انفعال ذره - زمینه که به مستحکم شدن منجر می شود در مقیاس اتمی یا مولکولی رخ می دهد. بنابر این تغییر شکل مومسان مشکل می شود و استحکام کششی ، تسلیم و سختی بهبود می یابد.

۲-۱ : کامپوزیت های درشت ذره :

کامپوزیت های درشت ذره آشنای دیگر بتون است که زمینه آن سیمان است و ذرات شن ماسه در آن وجود دارد . تقویت شدن موثر مستلزم آن است که ذرات کوچک باشد و بخوبی ر زمینه پراکنده شده باشد . کامپوزیت های درشت ذره با هرسه نوع ماده (فلزات ، پلیمرها، سرامیکها) مورد استفاده قرار می گیرند . سرمتهای نمونه کامپوزیت های سرامیک - فلز هستند . معروف ترین سرمتهای کاربرد های سماتنه هستند که از ذرات بسیار سخت یک سرامیک کاربیدی دیرگداز مثل کاربید تنگستن (WC) یا کاربید تیتانیوم (TiC) در زمینه از یک فلز مثل کبالت یا نیکل تشکیل شده اند . از این کامپوزیتها به عنوان ابزار فولادهای سخت

کاری شده استفاده می شود . ذرات خاصیت برشی را ایجاد می کنند و زمینه ، از بهم پیوستن این ذرات ترد و امکان اشاعه ترک از طریق آنها جلوگیری به عمل می آورد . دیرگداز بودن زمینه و ذرات باعث می شود که دمایی که در اثر برش مواد بسیار سخت ایجاد می شود تحمل شود . هیچ ماده ای به تنهایی ترکیب خواص سرمت را نمی تواند داشته باشد. درصد حجمی ذرات میتواند تا ۹۰٪ افزایش یابد و عمل سایندگی و برش را به حداکثر برساند.

الاستومر ها و پلاستیک ها غالبا با ذرات مختلفی نظیر کربن سیاه تقویت می شوند. کربن سیاه ذرات بسیار ریز و کروی شکل کربن هستند که از طریق احتراق گاز طبیعی یا روغن در محیطی کم هوا تولید می شود . این ماده ارزان وقتی به لاستیک ولکانیزه شده افزوده می شود استحکام کششی، چقرمگی و مقاومت سایندگی و گسیختگی را افزایش می دهد . تایر خودرو محتوی ۳۰٪-۱۵٪ حجمی کربن سیاه است . اندازه ذرات ۲۰-۵۰ nm است. ذرات کربن سیاه پیوند چسبنده مستحکمی با ماده لاستیک برقرار می سازند در حالی که سایر مواد مثل سیلیس چنین نیستند.

➤ بتن یک کامپوزیت معروف از نوع درشت ذره است که در آن هر دوز زمینه فاز پراکنده شده، مواد سرامیکی هستند.

۲-۲: کامپوزیتهای مستحکم شده با ذرات پراکنده :

فلزات و آلیاژهای فلزی را می توان با پراکنده سازی یکنواخت چند درصد حجمی ذرات ریز از یک ماده سخت و خنثی مستحکم نمود . فاز پراکنده شده فلزی یا غیر فلزی است . غالبا از مواد اکسیدی استفاده می شود . مکانیسم استحکام دهی در اینجا مانند سخت کاری رسوبی شامل فعل وانفعال بین ذرات و نابجائی ها درون زمینه است [۲].

نانو کامپوزیت ها :

فن آوری نانو و تولید مواد در ابعاد نانومتر، موضوع تحقیقاتی جذابی است که در دهه اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. نانو کامپوزیت ها نیز به عنوان یکی از شاخه های این فنآوری جدید، اهمیت بسیاری یافته اند و یکی از زمینه های تحقیقاتی فعال به شمار می آیند.

علاقه به نانو کامپوزیت ها در سراسر جهان سبب شده است که بسیاری از مراکز پژوهشی به مطالعه کاربردهای بالقوه این مواد بپردازند. نخستین تلاشهای موفقیت آمیز در تهیه نان کامپوزیتها به دهه های شصت و هفتاد قرن بیستم میلادی بر می گردد. با این وجود با تهیه نانو کامپوزیت هایی بر پایه نایلون ۶ و خاک رس در سال ۱۹۸۰ توسط شرکت ژاپنی توپوتا بود که تحقیقات برای ساخت این مواد شدت و سرعت بیشتری گرفت. پس از آن نیز شرکتهای یوبی (Ube) ، یونیکیتا (Unikita) ، هانی ول (Honeywell) و بایر کامپوزیت هایی بر پایه نایلون ۶ ارایه کردند که عمده کاربرد آنها در خودروسازی و صنایع بسته بندی بود.

از آن پس شرکت های دیگری نیز نانو کامپوزیتها را برای کاربردهای تجاری مورد مطالعه قرار داده اند و در اواخر سال ۲۰۰۱ شرکت های جنرال موتورز و باسل (Bassel) نخستین نانو کامپوزیتها را با پایه اولفین های گرمانرم برای کاربرد در قطعات بیرونی خودرو عرضه کردند.

نانو کامپوزیت ماده ای است که دست کم یکی از اجزای تشکیل دهنده آن در ابعاد نانو متر (۱۰۰-۱ نانو متر) باشد. پودرهای نانو کامپوزیتی نیز وجود دارند که شامل چندین نوع پودر گوناگون با اندازه هایی در محدوده نانو متر هستند. اندازه در این مواد بسیار مهم است. بسیاری از ویژگی های فیزیکی با بی نهایت کوچک شدن ذرات به شدت افزایش می یابند. دستیابی به مخلوطی در حد مولکولی از اهداف مهم دانشمندان است.

باید توجه داشت که تنها افزودن نانو ذرات به یک زمینه، منجر به ایجاد ویژگی های فوق العاده نخواهد شد. بلکه این ترکیب باید شرایطی را داشته باشد. مثلا فرض کنید یک سری ورقه های پرکننده به کامپوزیت افزوده شده باشد. اگر ورقه های کوچک معدنی به شورت متراکم به هم چسبیده باشند، رفتار این کامپوزیت تفاوت چندانی با کامپوزیت های معمولی ندارد. با عملیات حرارتی سطحی، فضای بین ورقه های معدنی افزایش می یابد و مولکولهای پلیمر بهتر می توانند بین ورقه ها حرکت کنند.

نانو کامپوزیت ها به دو صورت ممکن است وجود داشته باشند. در حالت اول، زمینه ماده ای است با دمای ذوب پایین همانند پلیمر، سرامیک یا فلزی زود ذوب که با فاز دومی از جنس مواد با دمای ذوب بالا همانند

سرامیک ها یا فلزات تقویت میشود. درحالت دوم، زمینه ماده ای سرامیکی یا فلزی با دمای ذوب بالا و فاز دوم ماده ای پلیمری، سرامیکی یا فلزی است. به این ترتیب انواع نانو کامپوزیتها عبارتند از :

(۱) نانو کامپوزیت های پلیمری

(۲) نانو کامپوزیت های سرامیکی

(۳) نانو کامپوزیت های سرامیک - فلز

(۴) نانو کامپوزیت های زمینه فلزی

(۱) نانو کامپوزیت های زمینه فلزی :

به طور کلی روش های ساخت نانو کامپوزیت های زمینه فلزی را می توان به سه دسته طبقه بندی کرد :

(۱) روش مایع (ریخته گری)

(۲) روش متالورژی پودر

(۳) آلیاژسازی مکانیکی

(۱) روش ریخته گری :

در روش ریخته گری، ذرات تقویت کننده به فلز مذاب اضافه شده و به صورت مکانیکی در داخل فلز توزیع می شوند. مهم ترین معایب روش ریخته گری جدا شدن ذرات از فاز مذاب است. تر نشدن ذرات فاز دوم به وسیله آلومینیوم مذاب و جدا شدن فاز نانو ذره، منجر به ایجاد ساختاری ناهمگن می گردد. گاهی نیز انجام واکنش بین نانو ذرات و فاز مذاب سبب افت خواص مکانیکی می گردد. به طور مثال در تولید نانو کامپوزیت Al/SiC به روش ریخته گری، واکنش بین ذرات SiC و فاز مذاب، سبب تشکیل فصل مشترک ترد و نامطلوب Al_4C_3 و Si شده که منجر به خواص مکانیکی نامطلوب می گردد .

یانگ و همکاران اش اخیراً روش جدیدی را برای ساخت نانو کامپوزیت های زمینه فلزی ابداع کرده اند که در آن نانو ذرات به فلز مذاب افزوده شده و با اعمال امواج مافوق صوت (اولتراسونیک) به فلز مذاب، از چسبیدن ذرات به یکدیگر جلوگیری می گردد. در این روش از طریق امواج مافوق صوت، هزاران میکرو حباب در داخل فلز مذاب تشکیل شده که با واپاشی آنها در زمانی بسیار کوتاه، تجمع ذرات نانومتری از بین می رود و امکان

چسبیدن ذرات به یکدیگر کاهش می‌یابد. لذا، ذرات داخل فلز مذاب پخش شده و توزیع یک‌نواختی از نانوذرات در داخل ساختار به وجود می‌آید .

این روش کاملاً مبتنی بر ریخته‌گری است و محققان در این روش نانوذرات را پس از ذوب زمینه، از بالای بوته اضافه می‌کنند. نکته‌ی قابل توجه افزایش ویسکوزیته‌ی فلز مذاب با افزایش درصد حجمی نانوذرات است که برای حل این مشکل، دمای مذاب را افزایش می‌دهند .

۲) روش متالورژی پودر :

در این روش، پودرهای آلیاژی یا خالص فلزی با نانوذرات مخلوط می‌گردند و سپس با پرس کردن ذرات پودر در داخل قالب و تف جوشی، ذرات پودری به یکدیگر متصل می‌شوند و با کاهش درصد حفره‌ها، چگالی افزایش می‌یابد. روش متالورژی پودر در مقایسه با روش ریخته‌گری دارای مزایای زیر می‌باشد :

- در حالت جامد- جامد، واکنش بین فاز دوم و زمینه به حداقل مقدار ممکن می‌رسد.
- امکان کنترل دقیق حجم فاز دوم به این روش ممکن است.
- امکان کنترل ضریب انبساط حرارتی و مدول کامپوزیت متناسب با کاربرد آن در این روش وجود دارد.

این روش البته، معایبی هم دارد. از قبیل: احتمال تجمع ذرات فاز تقویت کننده و توزیع غیریکنواخت آن‌ها در ساختار کامپوزیت، تفاوت اندازه ذرات فاز زمینه و تقویت کننده. اختلاف چگالی ذرات و باردار شدن آن‌ها مهم‌ترین دلیل توزیع غیریکنواخت فاز تقویت کننده و تجمع ذرات است. یکی از روش‌های مبتنی بر متالورژی پودر، روش پرس با سینتر هم‌زمان است که در طی آن میکروپودرهای زمینه با نانوذرات تقویت کننده در محفظه‌ای به مدت چند ساعت و با سرعت مشخص مخلوط می‌شوند تا در نهایت، تحت فشاری با هم فشرده شوند .

۳) آلیاژسازی مکانیکی :

شاید بتوان گفت در حال حاضر آلیاژسازی مکانیکی مهم‌ترین روش تولید نانو کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی است. در این روش، ذرات نانو پودری دو فاز با یکدیگر آسیاب می‌شوند، و با تغییر شکل، جوش خوردن و

شکست ذرات به صورت مکرر انتقال مواد صورت می‌پذیرد. در صورتی که ذرات نانوپودر ترکیب شیمیایی یکسانی داشته باشند و با عملیات خردایش فقط اندازه‌ی ذرات کاهش یابد، فرایند آسیای مکانیکی اتفاق می‌افتد، ولی چنانچه آسیای مکانیکی با انجام واکنش شیمیایی در حالت جامد- جامد و یا جامد- گاز همراه باشد، فرایند آسیای واکنشی نامیده می‌شود. برای ایجاد پودرهای کامپوزیتی می‌توان با اضافه کردن مستقیم ذرات فاز تقویت کننده به ذرات زمینه و آسیای هم‌زمان این ذرات، نانوپودرهای کامپوزیتی تهیه کرد. با افزایش زمان آسیاب کردن تحت انرژی زیاد، می‌توان ابعاد فاز تقویت کننده و حتی اندازه‌ی دانه‌های زمینه را تا حد نانومتر کاهش داد. قابل ذکر است که آسیای هم‌زمان، توزیع یکنواختی از ذرات نانومتری تقویت کننده در فاز زمینه را به دست می‌دهد [۳].

۲) نانو کامپوزیت های پلیمری :

نیاز اقتصادی و رو به افزایش سوخت در عرصه های مختلف، تقاضا برای استفاده از مواد جدید سبک وزن مانند پلیمرها را افزایش داده است. اما از طرفی با توجه به پایین تر بودن میزان استحکام پلیمرها در مقایسه با فلزات، تقویت آن ها ضروری به نظر می رسد. تقویت پلیمرها با مواد رایج سبب لطمه خوردن به دو ویژگی اصلی پلیمرها یعنی سبکی و سهولت فرآیند پذیری می شود. از این رو در تحقیقات اخیر از مقادیر کمی (کمتر از ۱۰٪ وزنی) نانوذرات به عنوان تقویت کننده در پلیمرها استفاده می شود .

نایلون ۶ اولین پلیمری بود که توسط شرکت تویوتا در سال ۱۹۹۰ برای تهیه نانوکامپوزیت ها به کار گرفته شد، اما امروزه از پلیمرهای ترموست نظیر اپوکسی ، پلی ایمید و پلیمرهای ترموپلاست نظیر پلی پروپیلن ، پلی استایرن عنوان ماده ی زمینه این کامپوزیت ها استفاده می گردد .

فاز تقویت کننده که در نانوکامپوزیت ها استفاده می شود شامل نانوذرات، نانوصفحات ، نانوالیاف و همچنین نانولوله ها می باشد. نانوذرات بیشترین کاربرد را به عنوان ماده تقویت کننده در نانوکامپوزیت ها دارند. نانوذره ای که در تهیه اغلب نانوکامپوزیت ها استفاده می شود خاک رس (Nanoclay) است.

اما اخیراً نانوذرات دیگری همچون سیلیکا، نانوذرات فلزی و ذرات آلی و غیرآلی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد .

در توسعه مواد چند جزئی چه در مقیاس نانو و یا میکرو سه موضوع مستقل باید مورد توجه قرار گیرد: انتخاب اجزاء، تولید، فرآوری و کارآیی. در مورد نانوکامپوزیت های پلیمری هنوز در اول راه می باشیم و با توجه به کاربرد نهایی آن ها زمینه های بسیاری برای توسعه وجود خواهد داشت .

به طور کلی سه روش برای تولید نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری وجود دارد. این روش ها شامل مخلوط سازی مستقیم ، فرآوری محلول و پلیمریزاسیون درجا می باشد. در ادامه این روش ها شرح داده خواهد شد .

الف- مخلوط سازی مستقیم

در این روش ابتدا نانوذرات تهیه شده به صورت سوسپانسیون در یک حلال حل شده و سپس به محلول پلیمری اضافه می شود و مخلوط حاصله توسط یک پرس هیدرولیک در یک قالب اکستروژن می شود و در نهایت صفحات نازک به دست می آیند. در این روش انتخاب بستر پلیمری، انتخاب نوع ذرات و سازگاری این دو گونه با یکدیگر و نحوه ی توزیع ذرات از نکات حائز اهمیت است که بایستی بر آن فائق آییم .

معمولاً برای تولید نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری حاوی نانوالیاف کربنی از این روش استفاده می شود. محدودیت این روش میزان فاز تقویت کننده یا همان مواد پرکننده است. به عنوان مثال برای تولید نانوکامپوزیت سیلیکا/پلی پروپیلن حداکثر میزان نانوذرات سیلیکا ۲۰ درصد وزنی می تواند باشد. البته به نظر می رسد آگلومره شدن (به هم چسبیدن) ذرات نیز از دیگر محدودیت های این روش باشد .

ب- فرآوری محلول

با استفاده از این روش می توان بر بعضی از محدودیت های روش مخلوط سازی مستقیم غلبه کرد، ضمن آنکه می توان میزان آگلومراسیون و کلوخه ای شدن نانوذرات در ماده پلیمری را کاهش داد. در این روش به دو صورت می توان نانوکامپوزیت های پلیمری را تولید کرد. اگر ماده زمینه پلیمری و

نانوذرات تقویت کننده آن در یکدیگر قابل حل شدن باشند، محلول حاصل را می توان در یک قالب؛ ریخته گری کرده و نانوکامپوزیت تولید نمود. در غیر این صورت مخلوط مواد نانوکامپوزیت در یک حلال حل شده و در نهایت با تبخیر حلال، نانوکامپوزیت مورد نظر به دست می آید .

ج- پلیمریزاسیون درجا

در این روش پلیمریزاسیون بستر پلیمری در حضور نانوذرات انجام می شود و منومر در حین رشد، ذرات پر کننده را در بر می گیرد. نکته کلیدی در این روش نحوه توزیع ذرات نانو در منومر است. با کنترل پیوند بین ذرات نانو و ماده زمینه، می توان توزیع مورد نظر را به دست آورد. بسیاری از نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری را می توان با این روش تولید کرد .

به طور مثال نانوکامپوزیت های حاوی نانولایه های گرافیت که دارای هدایت الکتریکی بالا و نفوذ پذیری کمی هستند، از این روش تولید می شوند. برای تولید این نانوکامپوزیت ها ابتدا با امواج مافوق صوت لایه های گرافیت در منومر به صورت یکنواخت توزیع می شوند و در نهایت با پلیمریزاسیون درجا نانوکامپوزیت به دست می آید .

نکته ای که در روش های تولید نانوکامپوزیت های پلیمری اهمیت دارد و آن را از یکدیگر متمایز می کند، توزیع مناسب ماده پر کننده است. با اصلاح سطحی می توان این توزیع را به شکل یکنواخت به گونه ای انجام داد که از آگلومراسیون اجزای نانومتری ماده پرکننده جلوگیری شود و توزیع مناسب فاز تقویت کننده فراهم گردد. در واقع نکته مهم در تمام این فرآیندها، اصلاح فصل مشترک بین پلیمر و نانوذره می باشد. استفاده از فرایندهای سطحی سبب توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده در بستر پلیمری شده، افزایش مدول و استحکام نانوکامپوزیت را به دنبال خواهد داشت [۴].

مراجع :

۱) <http://fa.wikipedia.org/wiki>

۲) www.iran-mavad.ir

۳) فتح الله کریم زاده، احسان قاسمعلی، سامان سالمی زاده "نانومواد؛ خواص، تولید و کاربرد" جهاد

دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۸۴

۴) نویسنده: مریم ملک دار

۱. M.Z.Rong, M.Q.Zhang, Y.X.Zhang, K.Friedrsh, Polymer ۴۲, (۲۰۰۱), ۳۳۰۱

۲. G.Caroteuto, Y.S.Her, E.Matijevic, Ind. Eng. Chem. RES ۳۵, (۱۹۹۶), ۲۹۲۹.

فصل دوم

مواد آمورف¹

مواد در حالت کریستالی: دارای نظم و چیدمان اتمی خاصی هستند، نظم اتمی پر دامنه، عدد همسایگی مشخص از جمله مشخصات این مواد می باشد.

فلزات با ساختار آمورف: اتم ها به صورت کاملاً تصادفی هستند، نظم اتمی در فواصل کوتاه (اولین اتم های همسایه) می باشد. ساختار اتمی در حالت آمورف مشابه ساختار اتمی در حالت مذاب می باشد. لذا این ساختار ها را می توان همانند یک مذاب با ویسکوزیته بالا (سفت) دانست.

شیشه ها (مثال شیشه بطری)

اجزای تشکیل دهنده آن ها، اکسید های غیر آلی هستند. برای مثال شیشه معمولی مانند شیشه بطری شامل 71 درصد SiO_2 ، 15 درصد Na_2O ، 12 درصد CaO و 2 درصد اکسید های دیگر می باشد.

وقتی ماده از حالت مذاب سرد می شود، دو حالت می توان در نظر گرفت:

1. مسیر abcd

اگر نرخ سرد کردن آهسته و کمتر از یک مقدار بحرانی باشد، مسیر abcd با تشکیل یک جامد کریستالی همراه است. در این حالت مذاب در دمای T_m ، کاهش ناگهانی و قابل ملاحظه ای می دهد (جوانه زنی و رشد فاز کریستالی).

2. مسیر abef

اگر نرخ سرد کردن بیشتر از یک مقدار بحرانی باشد، ممکن است مذاب از گستره انجماد عبور کند ولی متبلور نشود (جوانه زنی و رشد فاز کریستالی نداریم) و به مذابی فوق سرد (فوق تبرید شده) تبدیل شده و با کاهش دمای بیشتر، ویسکوزیته مذاب آن قدر افزایش پیدا می کند تا در T_g ، ویسکوزیته ی مذاب آن قدر بالا می رود، به طوری که مذاب مانند یک جامد رفتار می کند. در این حالت جامد به دست آمده ساختار آمورف یا شیشه ای دارد.

T_g : (دمای تبدیل شیشه ای): دمایی است که در آن دما، مذاب فوق سرد به حالت شیشه ای تبدیل می شود و ویسکوزیته مذاب در حدود 10^{13} Pa-s می باشد. دمای T_g نقطه ی عطف یا نقطه ی تغییر شیب منحنی است.

¹ Amorphous Materials

² glass transition temperature

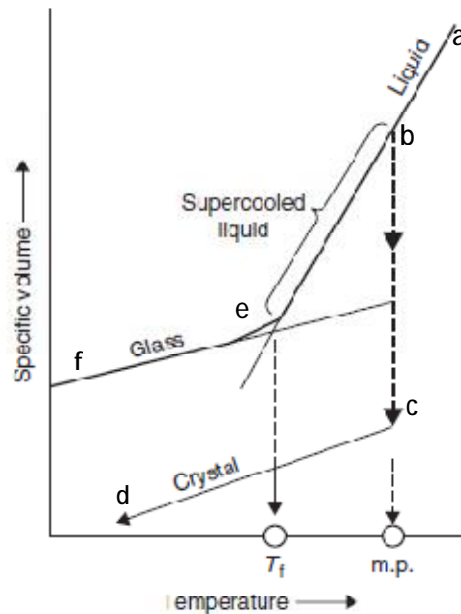


Figure 10.12 Comparison of the formation of glass and crystals from a melt.

Rc (آهنگ سرمایش بحرانی):

$R < R_c$ جامد کریستالی

$R > R_c$ شیشه

R_c : در شیشه ها پایین می باشد (کمتر از 10^{-1} k/s). لذا به آسانی می توان ساختار شیشه ای را به دست آورد. ولی R_c در آلیاژهای فلزی بالاتر از 10^5 K/S است. در

$R > R_c$ ، به دلیل کم تحرک بودن اتم ها (ویسکوزیته ی بالا) ماده قابلیت تبدیل به حالت کریستالی را ندارد.

با توجه به شکل بالا:

1. شیب منحنی abcd پس از تبلور کمتر از پیش از تبلور و شیب منحنی آمورف پس از عبور از T_m تغییر (نقطه ی انجماد) تغییر نمی کند.

2. در جامد کریستالی در نقطه ی T_m تغییر حجم داریم ولی در دمای تبدیل شیشه ای تغییر حجم نداریم.

3. در دماهای پایین تر از T_g شیب هر دو منحنی شیشه و جامد کریستالی تقریباً برابر است.

4. حجم جامد در حالت آمورف بیشتر از حالت کریستالی است.

T_g بستگی به آهنگ سرمایش دارد و یک کمیت ترمودینامیکی نیست. با افزایش آهنگ سرمایش T_g نیز افزایش می یابد و در ضمن با

افزایش نرخ سرد کردن، حجم مولی (حجم مخصوص) ماده ی آمورف نیز افزایش می یابد که نشان دهنده ی بیشتر بودن فاصله متوسط اتم ها می باشد.

ویسکوزیته (η): در سیستم بین المللی واحدها، واحد ویسکوزیته پاسکال-ثانیه می باشد. پواز $1 \text{Pa}\cdot\text{s} = 10$

شیشه های فلزی³

- با سرد کردن سریع فلزات از حالت مذاب می توان به شیشه های فلزی دست یافت. فلزات مذاب دارای ویسکوزیته ی پایینی هستند و خیلی سریع متبلور می شوند.

خواص شیشه های فلزی:

-شیشه های فلزی خواص منحصر به فردی شامل استحکام، سختی، تافنس و مقاومت به خوردگی بسیار بالا به علت عدم حضور نواقص کریستالی مانند نابه جایی ها و مرزدانه ها دارند.

-از نظر استحکام در حد قوی ترین فولادها و از نظر خواص الاستیکی مشابه پلیمرها هستند.

-استحکام تسلیم فلزات آمورف بالا بوده (2 درصد مدول یانگ آن ها می باشد).

-رفتار پلاستیکی بدون کارسختی (ویا حتی کمی کار نرمی) که باعث می شود مقاومت بالایی به رشد ترک داشته باشند و تافنس بالایی داشته باشند.

-استحکام کششی به علت نبود کارسختی با استحکام تسلیم آن ها تقریباً برابر است.

- از لحاظ ترمودینامیکی به شدت ناپایدارند و تمایل دارند با تبدیل به حالت کریستالی، انرژی آزاد خود را کاهش دهند. تبدیل ساختار آمورف به کریستالی فرآیند دیفوزیونی می باشد که در درجه حرارت هایی به اندازه کافی بالا صورت می پذیرد. مکانیزم، جوانه زنی و رشد می باشد و با کنترل این دو فرآیند می توان کریستال هایی در ابعاد نانومتری به دست آورد.

-اگرچه شیشه های فلزی مانند شیشه های غیر آلی، از مذاب های فوق سرد به دست می آیند و هردوی این ها را می توان جامدات بی شکل تلقی کرد. ولی شیشه های فلزی بسیاری از خواص فلزات حقیقی را دارند(جدول زیر).

ویژگی	فلزات	شیشه معمولی	فلزات شیشه ای
پیوند	فلزی	اشتراکی	فلزی
کار پذیری	خوب - داکتیل	ضعیف - ترد	خوب - داکتیل
استحکام کششی	کم تا زیاد	خیلی بالا	خیلی بالا
سختی	کم تا زیاد	خیلی بالا	خیلی بالا
هدایت حرارتی/الکتریکی	خیلی خوب	بد	خیلی خوب
مقاومت به خوردگی	ضعیف تا خوب	خیلی خوب	خیلی خوب

اشیاء بزرگ از شیشه های فلزی نمی توان ساخت زیرا نیاز به آهنگ سرمایش در حدود 10^5 k/s و برای فلزات خالص نیاز به حدود 10^{12} درجه سانتی گراد بر ثانیه می باشد. لذا بیشتر اشیاء ساخته شده به صورت پودر، سیم و نوار می باشد. کاربرد صنعتی این گروه از مواد در هسته ترانسفورماتورها، موتور های هواپیما، به عنوان الیاف تقویت کننده و لایه های با مقاومت بالا در مقابل خوردگی و سایش می باشد.

³ glass metals/ metallic glasses

توانایی تشکیل ساختار آمورف:

به طور کلی هر چه نرخ سرد کردن بحرانی (R_c) کمتر باشد، ماده با سهولت بیشتری به ساختار آمورف تبدیل میشود. اصولاً تمام مواد را میتوان به حالت آمورف تبدیل کرد، مشروط بر این که نرخ سرد کردن به اندازه کافی بالا باشد تا کریستالیزاسیون مذاب رخ ندهد. متأسفانه فلزات مذاب ویسکوزیته خیلی پایینی دارند و خیلی سریع متبلور (کریستاله) میشوند. بر اساس تحقیقات انجام شده گزارشی مینی بر موفقیت در تبدیل فلزات مذاب خالص به شیشه در دست نیست. از طرف دیگر، شیشه های فلزی با استفاده از بعضی آلیاژهای فلزی تولید شده اند. اغلب این آلیاژها ترکیب هایی نزدیک به نقاط یوتکتیک با دمای بسیار پایین داشته اند.

1- یک معیار برای توانایی مواد در تشکیل ساختار آمورف نسبت T_g/T_L می باشد.

T_g : دمای تبدیل به حالت شیشه ای

T_L : درجه حرارت شروع انجماد (درجه حرارت لیکوئیدوس)

آلیاژهایی که نسبت T_g/T_L بالاتری داشته، نرخ سرد کردن بحرانی آنها کمتر بوده و لذا راحتتر آمورف می شوند. برای اغلب سیستم های آلیاژی این نسبت در محدوده 0.45 تا 0.7 قرار دارد. مقادیر بیشتر از 0.5 برای تشکیل ساختار آمورف مطلوب می باشد.

تمرین

چرا ساختار آمورف در اغلب آلیاژهایی با ترکیباتی نزدیک به ترکیب یوتکتیک، به سهولت قابل دستیابی است؟

2- اختلاف شدید در اندازه ی اتمی عناصر سازنده ی آلیاژ (بیشتر از 12 درصد) باعث جلوگیری از کریستاله شدن می شود.

3- گرمای انحلال آلیاژ منفی می باشد. میزان گرمای انحلال یک آلیاژ، معیاری از قدرت پیوند های اتمی آن می باشد. هرچه قدر گرمای انحلال (ΔH_{mix}) برای دو اتم منفی تر باشد، پیوند اتمی قوی تر بین دو عنصر ایجاد می شود که کاهش قدرت تحرک و نرخ دیفوزیون اتم ها را به دنبال دارد.

روش های تولید شیشه های فلزی

1. ایجاد ساختار آمورف از حالت بخار:

بخار ماده به وسیله ی روش های فیزیکی و شیمیایی به دست می آید و سپس بر روی یک سطح سرد رسوب می کند. نرخ سرد شدن ماده در این حالت بسیار بالا و در حد 10^{12} درجه سانتی گراد بر ثانیه می باشد.

2. ایجاد ساختار آمورف از حالت مذاب

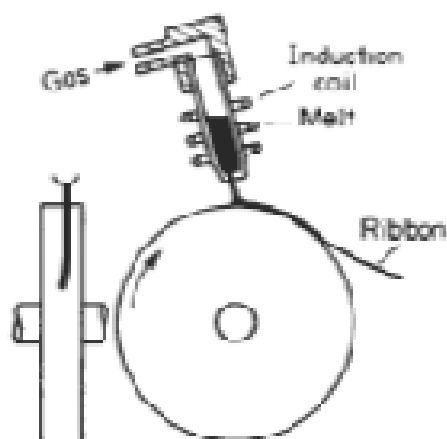
مذاب ماده با یک سطح با قابلیت انتقال حرارت بالا (معمولا از جنس مس) قرار می گیرد و به سرعت سرد می شود. نرخ سرد کردن مذاب باید در حدی باشد که جوانه زنی و رشد کریستال ها متوقف شود.

3. ایجاد ساختار آمورف از حالت جامد:

بر خلاف دو روش قبلی، حالت فیزیکی ماده در حین ایجاد فاز آمورف تغییر نمی کند. تابش با ذرات پرانرژی (نوترون، الکترون) و آلیاژسازی مکانیکی از جمله روش های تولید در این گروه هستند.

روش ریسندهی مذاب⁴:

در میان روش های متنوع انجماد سریع، روش ریسندهی مذاب معروفترین و پر کاربردترین روش می باشد. زیرا در این روش امکان تهیه نمونه به طور پیوسته وجود دارد. به این دلیل روش ریسندهی مذاب به طور گسترده ای در صنعت برای تولید مقادیر زیاد مواد آمورف مورد استفاده قرار می گیرد.



⁴ Melt spinning

-سرعت بحرانی تابع هدایت چرخ مسی که خود تابع صافی چرخ، میزان ترشوندگی سطح چرخ با مذاب و حضور لایه ی گازی بین سطح چرخ و لایه ی مذاب می باشد.

- به دلیل نازک بودن نوار، هیچ گونه شیب حرارتی در داخل نوار و یا چرخ وجود ندارد. نرخ سرد شدن مذاب توسط انتقال حرارت در فصل مشترک چرخ-مذاب کنترل می شود و درجه حرارت نوار به طور نمایی با زمان کاهش می یابد.

سیستم های آلیاژی با قابلیت تشکیل ساختار آمورف

1. سیستم فلزات انتقالی انتهایی به همراه شبه فلزات:

در این سیستم عناصر گروه VIII جدول تناوبی مانند آهن، کبالت و نیکل و یا عناصر گروه IB نظیر طلا به همراه عناصر شبه فلزی مانند بور و سیلیسیم قرار می گیرند. مناسب ترین ترکیب شیمیایی برای ساختار آمورف در محدوده ترکیب یونکتیک حاوی 13 تا 25 درصد اتمی از یک عنصر شبه فلز می باشد.

2. سیستم فلزات انتقالی ابتدایی - شبه فلزات:

فلزات انتقالی ابتدایی در گروه های VIA و VA و IVA همراه با شبه فلزات می توانند تشکیل ساختار آمورف بدهند. همانند گروه یک ترکیب شیمیایی مناسب در حوالی ترکیب یونکتیک می باشد. ترکیب یونکتیک معمولاً حاوی 20 درصد اتمی یک عنصر شبه فلز است. اضافه کردن عناصر فلزات انتقالی در این گروه افزایش توانایی تشکیل ساختار آمورف را سبب می شود.

3. سیستم فلزات انتقالی انتهایی - ابتدایی:

عناصر انتقالی شامل گروه های VIII و VIIIB و گروه IB فلزات مانند کبالت، نیکل، مس و... هستند. عناصر انتقالی ابتدایی شامل گروه های VB، IVB، VIB، نظیر تیتانیم، زیرکونیوم، نیوبیم و .. هستند. عناصر انتقالی ابتدایی نقطه ذوب بالا دارند. اضافه کردن عناصر انتقالی انتهایی به این عناصر باعث کاهش سریع دمای لیکوئیدوس و ایجاد نقطه یونکتیک در نمودار فازی آنها میشود.

4. آلیاژهای بر پایه ی آلومینیم:

این آلیاژها بیش از 75 درصد اتمی آلومینیم دارند و به خاطر نسبت استحکام به وزن بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. این آلیاژها معمولاً حاوی 5 تا 15 درصد اتمی لانتانیدها و 5 تا 15 درصد اتمی عناصر انتقالی هستند.

5. آلیاژهای بر پایه ی لانتانیدها:

این آلیاژها از یک لانتانید و 10 تا 35 درصد اتمی یک شبه فلز تشکیل می شوند. همچنین سیستم های آلیاژی دو تایی حاوی یک لانتانید و یک فلز انتقالی انتهایی تشکیل یک نقطه یونکتیک در ترکیبات غنی از لانتانید می دهند. آلیاژهای نزدیک به ترکیب یونکتیک قابلیت تبدیل به ساختار آمورف را دارند. در این گروه آلیاژهای شامل آلومینیم-لانتانید-یک فلز انتقالی انتهایی مانند $La_{55}Al_{25}Ni_{20}$ بویژه مورد توجه قرار دارند. این آلیاژها قابلیت تشکیل ساختار آمورف بسیار بالا از خود بروز می دهند، به طوری که نرخ سرد کردن بحرانی برای این آلیاژها بسیار پایین (کمتر از 10 درجه سانتی گراد بر ثانیه) است. به علاوه آلیاژهای آمورف این گروه مقاومت بسیار خوبی در برابر کریستالیزاسیون دارند. بدین معنی که در حدود 100 درجه سانتی گراد بالای دمای شیشه ای کریستاله می شوند. این در حالی است که اغلب آلیاژهای آمورف تنها کمی بالاتر از درجه حرارت T_g سریعاً حالت آمورف خود را از دست داده و به ساختار کریستالی تبدیل می شوند.

6. آلیاژهای بر پایه ی عناصر قلیایی خاکی:

آلیاژهای دو یا چند جزئی حاوی عناصر گروه IIA و برخی از عناصر گروه های IIB، IIB، IB، VIIA، IVA، و یا VIII قابلیت تبدیل به حالت آمورف در محدوده وسیعی از ترکیب شیمیایی را دارند. اضافه کردن یک لانتانید مانند ترکیب $Mg_{65}Cu_{25}Y_{10}$ میتواند به مقدار زیادی توانایی ایجاد ساختار آمورف را افزایش دهد.

واژه آلیاژهای حافظه دار به گروهی از مواد فلزی گفته می شود که زمانیکه در معرض شیوه حرارتی مناسب قرار گیرند امکان برگشت به شکل و اندازه قبلی خود را دارا می باشند. آلیاژهای حافظه دار تحت عنوان آلیاژهای هوشمند (Smart alloys) نیز نامیده می شوند این آلیاژها شکل اولیه خود را به خاطر می آورند و می توانند بعد از تغییر فرم به شکل اولیه خود باز گردند. این مواد معمولاً در دمای نسبتاً پایینی تغییر فرم پلاستیک داده می شوند و با حرارت دادن آن ها در دمای بالاتری به شکل اولیه خود که در قبل از تغییر فرم داشته اند، باز می گردند. در حال حاضر آلیاژهای حافظه داری که دارای اهمیت تجاری هستند شامل آلیاژهای نیکل - تیتانیم و آلیاژهای پایه مس نظیر Cu - Al - Ni و Al - Zn - Cu هستند. تحت تعریفی دیگر یک آلیاژ حافظه دار می تواند به آلیاژی گفته شود که مارتنزیت ترموالاستیکی در آن ایجاد شود. در این حالت، آلیاژ تحت نوعی استحاله مارتنزیتی قرار می گیرد که به آلیاژ اجازه می دهد توسط مکانیزم دوقلویی در زیر دمای استحاله تغییر فرم یاد. سپس هنگامی که ساختار دوقلویی با حرارت دادن به حالت اولیه خود بر می گردد، تغییر فرم معکوس می شود.

مشخصه های عمومی آلیاژهای حافظه دار

1. استحاله ترموالاستیکی

رفتار حافظه داری در آلیاژهای حافظه دار در اثر یک استحاله مارتنزیتی که وابسته به دما و مستقل از زمان است مربوط می شود، که به استحاله ترموالاستیکی مارتنزیتی معروف است. این استحاله از دگرگونی یک فاز آستنیت دما بالا که دارای نظم پر دامنه می باشد تشکیل می شود. این استحاله فازی در یک دمای خاص اتفاق نمی افتد و در یک محدوده دمایی که برای هر آلیاژ متفاوت است رخ می دهد.

2. حلقه هیسترزیس⁶

در آلیاژهای حافظه دار مسیر استحاله (دگرگونی) در گرم کردن و سرد کردن بر روی هم منطبق نمی شود. محدوده ی دمایی استحاله مارتنزیت به آستنیت (تحت تاثیر گرمایش)، بالاتر از محدوده دمایی استحاله آستنیت به فاز مارتنزیت (تحت تاثیر سرمایش) است. این اختلاف بین دماهای انتقال در سرد کردن و گرم کردن هیسترزیس نامیده می شود. عرض ناحیه هیسترزیس که در شکل با T نشان داده شده است بسته به سیستم آلیاژی تغییر می نماید.

⁵ Shape memory alloys

⁶ hysteresis

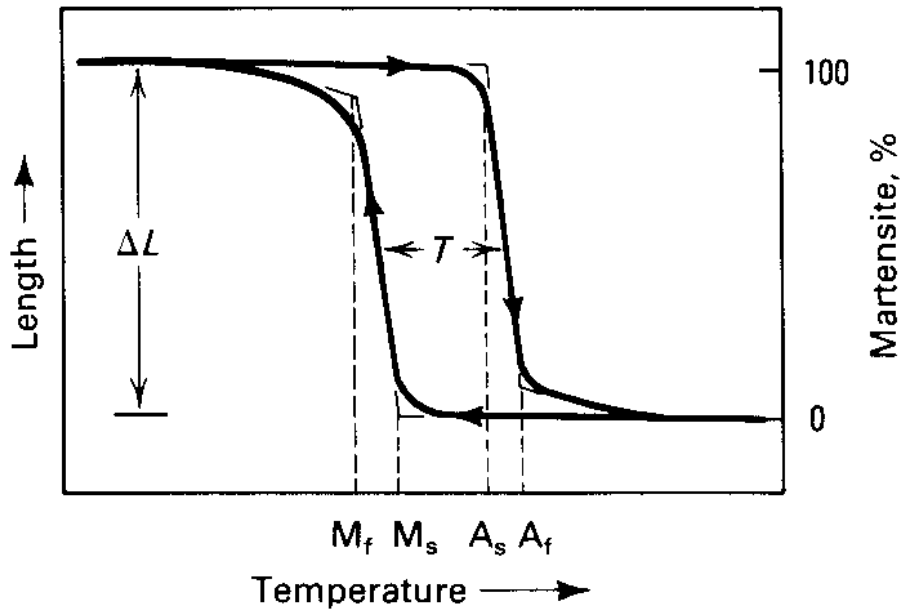


Fig. 1 Typical transformation versus temperature curve for a specimen under constant load (stress) as it is cooled and heated. T , transformation hysteresis. M_s , martensite start; M_f , martensite finish; A_s , austenite start; A_f , austenite finish

Table 1 Alloys having a shape memory effect

Alloy	Composition	Transformation-temperature range		Transformation hysteresis	
		°C	°F	Δ°C	Δ°F
Ag-Cd	44/49 at.% Cd	-190 to -50	-310 to -60	≈15	≈25
Au-Cd	46.5/50 at.% Cd	30 to 100	85 to 212	≈15	≈25
Cu-Al-Ni	14/14.5 wt% Al 3/4.5 wt% Ni	-140 to 100	-220 to 212	≈35	≈65
Cu-Sn	≈15 at.% Sn	-120 to 30	-185 to 85		
Cu-Zn	38.5/41.5 wt% Zn	-180 to -10	-290 to 15	≈10	≈20
Cu-Zn-X (X = Si, Sn, Al)	a few wt% of X	-180 to 200	-290 to 390	≈10	≈20
In-Ti	18/23 at.% Ti	60 to 100	140 to 212	≈4	≈7
Ni-Al	36/38 at.% Al	-180 to 100	-290 to 212	≈10	≈20
Ni-Ti	49/51 at.% Ni	-50 to 110	-60 to 230	≈30	≈55
Fe-Pt	≈25 at.% Pt	≈-130	≈-200	≈4	≈7
Mn-Cu	5/35 at.% Cu	-250 to 180	-420 to 355	≈25	≈45
Fe-Mn-Si	32 wt% Mn, 6 wt% Si	-200 to 150	-330 to 300	≈100	≈180

Source: Ref 5

مارتنزیت ترموالاستیک:

مارتنزیت ترموالاستیک دارای یک فصل مشترک لغزان و با انرژی کم می باشد به طوری که می توان تحت تغییرات دما و تنش کوچک آن را به حرکت در آورد. لذا مارتنزیت ترموالاستیکی از نظر کریستالوگرافی برگشت پذیر می باشد.

اثر حافظه داری:

عموماً توانایی یک ماده برای برگشت به شکل اولیه را خاصیت حافظه داری می گویند. آلیاژهای حافظه دار، رفتار حافظه داری خود را به دو صورت یک طرفه و دو طرفه می توانند بروز دهند که در ادامه به شرح آن ها پرداخته می شود.

اثر حافظه داری یک طرفه (One way shape memory effect):

هنگامی که آلیاژ حافظه داری با ساختار کریستالی آستنیتی تا زیر دمای M_f سرد شود، استحاله مارتنزیتی رخ خواهد داد. اگر در این وضعیت نمونه تغییر شکل داده شود و سپس به دمایی بالاتر از دمای A_f رسانده شود، به شکل اولیه خود در حالت آستنیتی باز می گردد. به این اثر اصطلاحاً اثر حافظه داری یک طرفه گفته می شود مشروط به این که اگر نمونه دوباره تا دمای پایداری فاز مارتنزیت سرد شود، به شکلی که قبلاً در فاز مارتنزیت تغییر یافته بود تبدیل نگردد.

اثر حافظه داری دو طرفه (Two way shape memory effect):

اگر نمونه آستنیتی تا دمایی زیر M_f سرد شود و در این دما تغییر شکل یابد، سپس تا دمایی بالاتر از A_f گرم شود، ضمن تبدیل شدن فاز مارتنزیت به آستنیت به شکل اولیه خود نیز باز می گردد. در شرایطی که این ماده دوباره به زیر دمای M_f رسانده شود و به وضعیت تغییر شکل یافته خود در حالت مارتنزیتی تبدیل شود، ماده اثر حافظه داری دو طرفه خواهد داشت. به طور خلاصه:

موادی که اثر حافظه دار بودن خود را تنها در گرم کردن نشان دهند، به عنوان آلیاژهای حافظه دار یک طرفه نامیده می گردند. بعضی از مواد علاوه بر این، در هنگام سرد کردن مجدد، شکل خود را تغییر می دهند. این مواد دارای اثر حافظه دار بودن دو طرفه می باشند.

آلیاژهای حافظه دار تجارتي:

الف) آلیاژهای نیکل - تیتانیوم

ب) آلیاژهای بر پایه مس

الف) آلیاژهای نیکل - تیتانیوم

- دارای کرنش حافظه دار بودن تا میزان 8% هستند.

- مقاومت به خوردگی عالی

- دارای حد حلالیت متوسطی برای نیکل و یا تیتانیوم اضافی و همچنین سایر عناصر فلزی هستند

-به دلیل واکنش پذیری تیتانیم در این آلیاژها، کلیه عملیات ذوب بایستی در خلاء یا اتمسفر محافظ صورت گیرد.
-عملیات حرارتی که باعث اثر حافظه دار شدن در آلیاژ می گردد، اغلب در دمای $800^{\circ}\text{C} - 500$ انجام می پذیرد ولی می توان آن را در دمای پائین (300- 350) درجه سانتی گراد به شرط این که در این دما به مدت زمان کافی نگهداری شود، انجام داد.

ب) آلیاژهای حافظه دار بر پایه مس
-این آلیاژها به صورت آلیاژهای سه تایی $\text{Cu} - \text{Zn} - \text{Al}$ و $\text{Cu} - \text{Al} - \text{Ni}$ موجد می باشند یا به صورت آلیاژهای اصلاح شده چهارتایی که حاوی منگنز هستند، وجود دارند.
-دارای کرنش حافظه دار بودن تا میزان 5% - 4 می باشند.
-مقاومت به خوردگی متوسط
-نسبت به آلیاژهای $\text{Ti} - \text{Ni}$ ارزاتر بوده
-از دو روش ساخت ذوب و ریخته گری و متالورژی پودر برای تولید تجاری این آلیاژها، استفاده می شود.

کاربردها:

1. بازیابی آزاد free recovery
2. بازیابی محدود شده Constrained recovery
3. محرک های نیرو force actuator
4. کنترل مناسب proportional control
5. کاربردهای سوپر الاستیک Super elastic – application

1. بازیابی آزاد:

در این حالت، تنها وظیفه ای که آلیاژ حافظه دار ایفا می نماید، برگشت نمونه به شکل اولیه خود بر اثر اعمال حرارت میباشد. کاربرد اصلی این پدیده در فیلتر نمودن لخته های خون است.

2. بازیابی محدود شده:

مثال: جفت کننده و اتصال دهنده لوله ها، این بست های جفت کننده به صورت حلقه استوانه ای شکل با قطر کوچکتر نسبت به لوله هایی که باید به هم جفت شوند، تولید شده و سپس در حالت مارتنزیتی قطر آن ها افزایش داده می شود تا قابل جا خوردن بر روی قطر خارجی لوله گردند و بر اثر حرارت دادن و تبدیل به فاز آستنیت منقبض شده و دو سر لوله های اتصالی را به هم جفت می کنند.

3. محرک های نیرو

نمونه حافظه دار برای اعمال نیرو در محدوده فاصله ای قابل توجه و اغلب به صورت رفت و برگشتی استفاده می شود مانند شیر اطمینان (ایمنی) در هنگام آتش سوزی

4. کنترل مناسب

می توان تنها بخشی از بازیابی شکل (تغییر ابعادی) را در آلیاژ حافظه دار انجام داد مانند شیرهای کنترل جریان مایع که با حرارت دادن دقیق یک نمونه از آلیاژ حافظه دار می توان شیر را به اندازه مورد نظر، باز یا بسته نمود.

5. فاز برد سوپر الاستیک

مانند قاب های عینک، از خاصیت سوپر الاستیک آلیاژ Ni - Ti، جهت جذب تغییر فرم های بزرگ بدون آسیب رسیدن به قاب عینک و جلوگیری از خم شدن دائمی آن استفاده می کنند.

Table 2 Properties of binary Ni-Ti shape memory alloys

Properties	Property value
Melting temperatures, °C (°F).....	1300 (2370)
Density, g/cm ³ (lb/in. ³)	6.45 (0.233)
Resistivity, μΩ · cm	
Austenite	≈100
Martensite	≈70
Thermal conductivity, W/m · °C (Btu/ft · h · °F)	
Austenite	18 (10)
Martensite	8.5 (4.9)
Corrosion resistance	Similar to 300 series stainless steel or titanium alloys
Young's modulus, GPa (10 ⁶ psi)	
Austenite	≈83 (≈12)
Martensite	≈28-41 (≈4-6)
Yield strength, MPa (ksi)	
Austenite	195-690 (28-100)
Martensite	70-140 (10-20)
Ultimate tensile strength, MPa (ksi)	895 (130)
Transformation temperatures, °C (°F).....	-200 to 110 (-325 to 230)
Latent heat of trans- formation, kJ/kg · atom (cal/g · atom)	167 (40)
Shape memory strain.....	8.5% maximum

Table 3 Properties of copper-base shape memory alloys

Property	Property value	
	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Thermal properties		
Melting temperature, °C (°F)	950–1020 (1740–1870)	1000–1050 (1830–1920)
Density, g/cm ³ (lb/in. ³)	7.64 (0.276)	7.12 (0.257)
Resistivity, μΩ · cm	8.5–9.7	11–13
Thermal conductivity, W/m · °C (Btu/ft · h · °F)	120 (69)	30–43 (17–25)
Heat capacity, J/kg · °C (Btu/lb · °F)	400 (0.096)	373–574 (0.089–0.138)
Mechanical properties		
Young's modulus, GPa (10 ⁶ psi)(a)		
β phase	72 (10.4)(a)	85 (12.3)(a)
Martensite	70 (10.2)(a)	80 (11.6)(a)
Yield strength, MPa (ksi)		
β phase	350 (51)	400 (58)
Martensite	80 (11.5)	130 (19)
Ultimate tensile strength, MPa (ksi)	600 (87)	500–800 (73–116)
Shape memory properties		
Transformation temperatures, °C (°F)	<120 (250)	<200 (390)
Recoverable strain, %	4	4
Hysteresis, Δ°C (Δ°F)	15–25 (30–45)	15–20 (30–35)
(a) The Young's modulus of shape memory alloys becomes difficult to define between the M _s and the A _s transformation temperatures. At these temperatures, the alloys exhibit nonlinear elasticity, and the modulus is both temperature- and strain-dependent.		

ترکیبات بین فلزی (Intermetallic compound)

ترکیبات بین فلزی یا واسط از ترکیب دو عنصر یا بیشتر تشکیل شده اند. این ها، ترکیباتی هستند با نسبت اجزاء، شبکه کریستالی و خواص مربوط به خود، که با شبکه کریستالی و خواص هر یک از عناصر تشکیل دهنده خود تفاوت دارند. علاوه بر این آلیاژهای بر پایه ترکیبات بین فلزی منظم، دسته منحصر به فردی از مواد فلزی را تشکیل می دهند که دارای ساختارهای کریستالی با نظم پر دامنه در زیر دمای بحرانی مشخصی هستند که این دما اصطلاحاً دمای منظم شدن بحرانی (T_c)، نامیده می شود. این ترکیبات بین فلزی منظم، معمولاً در محدوده های ترکیبی نسبتاً باریکی در حول نسبت استوکیومتری خود، تشکیل می شوند.

نیروهای اتصال در انواع کریستال های بین فلزی:

نیروهای اتصال در انواع کریستال های بین فلزی از نوع پیوندهای فلزی خالص نیست و می تواند شامل پیوندهایی از نوع یونی و کوالانسی باشد و بدین دلیل است که با نام ترکیبات (فازهای) بین فلزی معروف است. ساختار کریستال های بین فلزی توسط نوع پیوند و اندازه اتم های تشکیل دهنده ترکیب تعیین می شود. هزاران نوع کریستال های بین فلزی وجود دارد که بسیاری از آن ها (اما نه تمام آن ها) را می توان به گروه های خاص و معینی تقسیم بندی کرد.

فازهای هیوم راتری (Hume Rottery phase):

هیوم راتری مشخص کرد که تعداد زیادی از آلیاژها، موقعی که غلظت الکترون های ظرفیت آنها یا به عبارت دیگر نسبت تعداد الکترون های ظرفیت به تعداد کل اتم های آن ها یعنی e/a مقدار معینی باشد، فازهای بین فلزی با ساختار کریستالی معینی را تشکیل می دهد. بدین ترتیب ترکیبات معینی با نسبت های غلظت الکترون ظرفیت $\frac{7}{4}$ ، $\frac{21}{13}$ ، $\frac{3}{2}$ مشاهده شده است. برای تعیین نسبت غلظت الکترون های ظرفیت این چنین عمل می شود که برای عناصر واسطه در جدول عناصر یعنی عناصر Pd, Pt, Ni, Co, Fe ظرفیت صفر فرض می شود، بدین معنی که فرض می شود این عناصر هیچ الکترونی رد و بدل نمی کنند. برای عناصر دیگر عدد ستون متعلق به فلز موجود در جدول عناصر را که با فلز مطابقت می کند انتخاب می کنند. بنابراین برای فلزات Au, Ag, Cu عدد 1 برای Be, Cd, Zn, Mg عدد 2، برای Al عدد 3، برای Ge, Sn, Si عدد 4 و برای Sb عدد 5 انتخاب می شود.

مثال:

$$Cu_{31}Sn_8: \frac{e}{a} = \frac{31 \times 1 + 8 \times 4}{39} = \frac{21}{13}$$

$$CuZn: \frac{e}{a} = \frac{1 \times 1 + 1 \times 2}{2} = \frac{3}{2}$$

فازهای لوی (Laves Phases)

در این نوع ترکیبات بین فلزی عمدتاً ضرایب هندسی تعیین کننده هستند و بیشتر تمایل به ایجاد ساختار کریستالی با مترکم ترین فرم را دارند. بنابراین این نوع ترکیبات توسط نسبت شعاع اتمی عناصر تعیین می شود و فرمول عمومی فازهای لوی AB_2 است.

ترکیبات بین فلزی غالباً سخت و ترد بوده، اما دارای نقطه ذوب بالا و مقاومت خوردگی و خزشی خوبی هستند. توجه در چندین سال گذشته بر روی مواد بر پایه آلومینایدهای نیکل (مانند NiAl, Ni₃Al)، مواد بر پایه آلومینایدهای آهن (مانند FeAl, Fe₃Al) و مواد بر پایه آلومینایدهای تیتانیم (نظیر TiAl, Ti₃Al) متمرکز گردیده است. این آلومینایدها دارای میزان آلومینیوم کافی هستند تا در محیط های اکسیدکننده، لایه نازکی از آلومینای (Al₂O₃) متراکم و محافظ را تشکیل دهند. این ترکیبات هم چنین دارای چگالی های پائین و نقاط ذوب نسبتاً بالا بوده و دارای خواص استحکامی خوب در دمای بالا هستند.

آلومینایدهای نیکل

این آلومینایدها دارای دو ترکیب NiAl، Ni₃Al می باشند که ترکیب Ni₃Al دارای ساختار کریستالی L1₂ است که از ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکز دار مشتق شده و NiAl دارای ساختار B₂ است که از ساختار کریستالی مکعبی مرکزدار (bcc) مشتق شده است. به خاطر دارا بودن ساختارهای کریستالی متفاوت، این دو آلومیناید نیکل دارای خواص فیزیکی و مکانیکی بسیار متفاوتی هستند.

آلومینایدهای Ni₃Al

دارای استحکام عالی و مقاومت به اکسیداسیون خیلی خوب در دماهای بالا هستند. این ترکیبات بین فلزی دارای سابقه طولانی استفاده به عنوان جزء مستحکم (مقاوم) کننده برای سوپر آلیاژهای پایه نیکل مورد کاربرد در دمای بالا، بوده اند که استحکام قابل توجهی را در آلیاژ مزبور ایجاد می نمایند، که ناشی از پراکنده شدن ذرات رسوب ریز فاز γ منظم (Ni₃Al) در زمینه قابل انعطاف غیر منظم است.

تک کریستال های Ni₃Al در دمای محیط قابل انعطاف هستند، ولی Ni₃Al کریستالی براثر شکست ترد مرز دانه ای، دچار از کارافتادگی می شود. برای رفع این محدودیت از افزودن مقادیر کمی بور (حدود 0.1 wt %) استفاده می شود، که نه تنها رفتار تردی Ni₃Al را حذف می نماید، بلکه باعث خاصیت چکش خواری بسیار بالایی می شود که قابلیت انعطاف آن در کشش به میزان زیاد 50% در دمای محیط خواهد رسید هم چنین افزودن عناصر میکرو آلیاژی نظیر کروم، آهن، زیرکونیم و مولیبدن می توانند این نقش را ایفا کنند. این افزودنی ها سبب افزایش استحکام، قابلیت ریخته گری و مقاومت به خوردگی می شوند.

وابستگی غیرعادی استحکام تسلیم به دما در Ni₃Al

Ni₃Al یکی از چند آلیاژ بین فلزی می باشد که تنش تسلیم آن با افزایش دما زیاد می گردد. این رفتار تسلیم شدن غیر عادی، به خاطر کار سخت شدن فوق العاده سریع اتفاق می افتد. این رفتار غیرعادی سبب مستحکم تر شدن Ni₃Al در دماهای بالا نسبت به بسیاری از آلیاژهای محلول جامد نظیر فولاد زنگ نزن می شود.

فرآیند ساخت:

قطعات از جنس آلومیناید نیکل می توانند توسط تکنیک متالورژی پودر، ریخته گری و شکل دادن شمش تولید شوند.

کاربردها:

- قطعات مورد استفاده در کوره های عملیات حرارتی

- توربین های گازی، آبی و بخار

- پیستون ها و سوپاپ ها

- ابزار

آلومیناید NiAl:

این ترکیب دارای بیش از 40 at % نیکل است و دارای نقطه ذوب بالاتر و چگالی پایین تر نسبت به Ni₃Al می باشد و در دمای بالای 600 °C بسیار قابل انعطاف می گردد. بنابراین ساخت NiAl در دمای بالا مشکل چندانی را در بر ندارد. ولی به دلیل قابلیت انعطاف ضعیف آن در دمای محیط و مقاومت به خزش پائین آن در دماهای بالا، استفاده گسترده از آن به عنوان یک قطعه سازه ای، هنوز چندان عملی نشده است با افزودن عناصر آلیاژی می توان استحکام و مقاومت به خزش را بهبود داد. مقاومت به اکسیداسیون NiAl می تواند با آلیاژ کردن آن با ایتیم و سایر عناصر دیرگداز نظیر هافنیم و زیرکنیم، بهبود بیشتر یابد.

آلومینایدهای آهن

آلومینایدهای آهن، ساختارهای کریستالی منظم شده با شبکه bcc را در محدوده ترکیب شیمیایی 25 - 50 at % تشکیل می دهند. این آلومینایدها علاوه بر مقاومت به خوردگی عالی، دارای هزینه کم و چگالی پائین هستند ولی عیب اصلی آلومینایدهای آهن در قابلیت انعطاف کم و تافنس شکست پائین در دمای محیط، استحکام ضعیف در دمای بالای 600 °C و مستعد بودن برای تردی محیطی است. این تردی، ناشی از واکنش بخار آب موجود در هوا با عناصر فعال (مثل آلومینیوم) در ترکیبات بین فلزی است که سبب ایجاد هیدروژن اتمی می شود و باعث حرکت آن به داخل فلز می گردد که شکست زود هنگام را نتیجه می دهد. افزودن دی بوراید تیتانیم (TiB₂) به پودرهای Fe₃Al در کاهش اندازه دانه بسیار موثر است و سبب افزایش قابلیت انعطاف می گردد. آلومینایدهای FeAl که دارای آلومینیوم به میزان 40 at % یا بیشتر هستند، بر اثر شکست مرز دانه ای در دمای محیط، دچار از کار افتادگی می شوند و دارای انعطاف پذیری کمی هستند. افزودن مقادیر جزئی از بور در حد (0/05 تا 0/2 درصد) از وقوع شکست مرز دانه ای جلوگیری کرده و افزایش کمی در قابلیت انعطاف آلیاژ Fe - 40 Al را در پی دارد.

آلومینایدهای تیتانیم

آلومینایدهای تیتانیم که شامل TiAl و Ti₃Al می باشند به دلیل چگالی پایینی که دارند برای قطعات پیشرفته در موتور هواپیما و اجزاء بدنه هواپیما استفاده می شوند. رفتار خزشی آلومینایدهای تیتانیم از آلیاژهای تیتانیم بهتر است. از آنجاییکه این مواد دارای سرعت دیفوزیون آهسته تری نسبت به آلیاژهای تیتانیم مرسوم می باشند، آلومینایدهای تیتانیم دارای خواص دما بالای بهتری نظیر حفظ استحکام در دماهای بالا، خزش و مقاومت به خستگی و مقاومت به گسیختگی تحت تنش هستند.

مقاومت به اکسیداسیون آلومینایدهای تیتانیم در دمای بالا نسبت به آلومینایدهای دیگر ذکر شده پائین تر است. این به دلیل تمایل شدیدتر برای تشکیل لایه TiO_2 به جای لایه Al_2O_3 محافظ می باشد و به همین دلیل فاکتور اساسی در افزایش حداکثر دمای کاری برای این نوع از آلومینایدها، افزایش مقاومت به اکسیداسیون با حفظ میزان کافی از مقاومت خزش و حفظ استحکام در دمای بالا می باشد.

افزایش میزان نایابیوم در Ti_3Al معمولاً سبب بهبود بیشتر خواص در این مواد می شود. ولی استفاده از مقادیر بیش از حد نایابیوم می تواند خواص خزشی آلیاژ را کاهش دهد. استفاده از مقادیر نایابیوم بالاتر سبب تبدیل فاز $\alpha-2 (Ti_3Al)$ به ساختار جدید ارتورمبیک منظم می شود این حالت در مورد آلومینایدهای تیتانیم با ترکیبات نزدیک به $Ti (21 - 25) Al (21 - 27) Nb$ at% مشاهده شده است.

آلیاژهای گاما ($\gamma-TiAl$)

فاز $\gamma-TiAl$ دارای ساختار تتراگونال با وجوه مرکزدار و منظم می باشد. فاز $\gamma-TiAl$ تقریباً به صورت منظم تا نقطه ذوب این آلیاژ که حدود 1450 درجه سانتی گراد است باقی می ماند. آلیاژهای که دارای اهمیت مهندسی هستند، دارای حدود 45-48 درصد اتمی Al و 10-1 درصد اتمی فلزاتی دیگر نظیر وانادیم، کروم، منگنز، نایابیوم، تانتالم و تنگستن است. شیوه های ذوبی که در تولید این آلیاژ دارای اهمیت هستند عبارتند از ذوب القایی و ذوب قوس الکتریک در خلاء.