

شکل ۳-۵: (الف) طرح نمادین جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن ریزحفرات در ذرات رسوبی در یک آلیاژ فلزی داکتیل، (ب) دیمپل‌ها روی سطح شکست یک آلیاژ آلومینیوم.

۳-۴) زمینه‌های متداول در کامپوزیت‌های فلزی

۳-۴-۱) آلومینیوم و آلیاژهای آن

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل چگالی کم و استحکام، چقرمگی و مقاومت به خوردگی عالی آنها، به طور گسترده در صنایع خودروسازی و هوافضا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، آلیاژهای Al-Cu-Mg و Al-Zn-Mg-Cu از جمله آلیاژهای بسیار مهم رسوب سختی شونده می‌باشند.

آلیاژهای آلومینیوم را می‌توان به اقسام ریختگی، کارپذیر و پیرسخت شونده طبقه بندی نمود. برخی از عملیات متداول پیرسختی یا رسوب سختی برای آلیاژهای آلومینیوم به شرح زیر است:

- T4: محلول سازی^۱، کوئنچ کردن و سپس پیرسازی در دمای اتاق یا «پیرسازی طبیعی».

- T6 : محلول سازی، کوئنچ کردن و سپس پیرسازی در دمای بالاتر از دمای اتاق (190°C - 120°C) یا «پیرسازی مصنوعی».
 - T7x : محلول سازی، کوئنچ کردن و فراپیرسازی (فرتوت سازی).
 - T8xx : محلول سازی، کوئنچ کردن، کار سرد و پیرسازی مصنوعی.
- دمای محلول سازی نوعاً بین 440°C و 540°C است و محیط کوئنچ کردن می‌تواند آب یا یک خنک کننده مصنوعی باشد.
- مذاب آلومینیوم همانند بیشتر فلزات، ویسکوزیته کمی دارد که باعث تسهیل در امر ریخته گری می‌شود. ارتباط دما با ویسکوزیته مذاب آلومینیوم بدین ترتیب است (Smithells, 1976):

$$\eta = 0.1492 \exp\left(\frac{1984/5}{RT}\right)$$

که η ویسکوزیته بر حسب $\text{MPa}\cdot\text{s}$ ، R ثابت جهانی گازها (8.3144 J/K mol) و T دما بر حسب کلوین است. در نقطه ذوب، آلومینیوم خالص ویسکوزیته‌ای تقریباً $12 \text{ MPa}\cdot\text{s}$ دارد. افزودن ذرات سرامیکی یا آخال‌ها به آن، به سرعت ویسکوزیته را بالا می‌برد. این امر یکی از معضلات مهم در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است (به فصل ۴ مراجعه کنید).

۲-۴-۳) آلیاژهای تیتانیم

تیتانیم یکی از مهمترین مواد به کار رفته در صنایع هوافضا است. تیتانیم خالص دارای چگالی 4.5 g/cm^3 و مدول یانگ آن 115 GPa است. در آلیاژهای تیتانیم

این عوامل، تیتانیم را به گزینه‌ای مطلوب برای کاربرد در صنایع هوافضا بدل نموده است. آلیاژهای تیتانیم در موتور جت (تیغه‌های توربین و کمپرسور)، قطعات بدنه هواپیما و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما در هر حال، این فلز جزو فلزات گران قیمت محسوب می‌شود.

در سرعت‌های بسیار بالا، مثلاً در هواپیماهای نظامی مافوق صوت، روکش هواپیما در اثر حرارت آنقدر داغ می‌شود که آلیاژهای آلومینیوم گزینه مناسبی برای آن نیستند. آلیاژهای تیتانیم باید در چنین دماهای بالایی مورد استفاده قرار گیرند. در یک هواپیمای مافوق صوت، پرواز با سرعت‌های بیشتر از ۲ ماخ، دما را حتی از آنچه که آلیاژهای تیتانیم نیز می‌توانند تحمل کنند، بالاتر می‌برد. آلومینایدهای تیتانیم اولین ماده کاندیدا برای کار در این شرایط به شمار می‌آیند.

تیتانیم دارای دو آلوتروپی است؛ الف) تیتانیم آلفا (α) که ساختار HCP دارد و زیر دمای 885°C پایدار است و ب) تیتانیم بتا (β) که ساختار BCC داشته و بالاتر از 885°C پایدار است. آلومینیوم دمای استحاله $\alpha \rightarrow \beta$ را افزایش می‌دهد؛ به عبارت دیگر آلومینیوم پایدار کننده فاز آلفاست. اغلب عناصر آلیاژی (V , Mo , Cr , Mn , Fe) و Ta دمای استحاله مزبور را کاهش داده و پایدار کننده فاز بتا هستند. بنابراین سه نوع آلیاژ کلی را می‌توان تولید نمود: آلیاژهای تیتانیم α ، $\alpha + \beta$ و β . آلیاژ Ti-6Al-4V معروف به اسب کاری^۱ آلیاژهای تیتانیم در صنایع هوافضا، به گروه $\alpha + \beta$ تعلق دارد. اغلب آلیاژهای تیتانیم بعد از کار گرم در منطقه $\alpha + \beta$ که باعث شکسته شدن ساختار و توزیع فاز بسیار ریز β می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تیتانیم میل ترکیبی زیادی با اکسیژن، هیدروژن و نیتروژن دارد. تنها وجود چند ppm از این عناصر بین نشین در تیتانیم، می‌تواند خواص مکانیکی را به شدت تغییر دهد. ضمناً ممکن است این تغییرات ریزساختاری باعث ترد شدن شدید آلیاژ گردد. به

^۱ Work Horse

همین دلیل است که جوشکاری تیتانیم، امری مشکل بوده و نیاز به محافظت زیادی در برابر اتمسفر دارد. معمولاً روش‌های پرتو الکترونی در خلا برای این آلیاژها به کار برده می‌شوند.

۳-۴-۳) منیزیم و آلیاژهای آن

منیزیم و آلیاژهای آن، گروه دیگری از فلزات سبک محسوب می‌شوند. منیزیم با داشتن چگالی 1.74 g/cm^3 ، یکی از سبک‌ترین فلزات به شمار می‌آید. آلیاژهای منیزیم، مخصوصاً آلیاژهای ریختگی آن، در بدنه جعبه دنده خودرو و هواپیما، محفظه‌اره زنجیری، پوشش رایانه‌های همراه، ادوات الکترونیکی و غیره استفاده می‌شوند. منیزیم دارای ساختار متراکم هگزاگونال است که این ساختار محدودیت‌هایی را برای تغییر شکل پلاستیکی آن توسط لغزش در دمای اتاق ایجاد کرده است.

۳-۴-۴) کبالت

کبالت یک زمینه فلزی بسیار متداول است که اغلب در کامپوزیت‌های WC/Co به کار می‌روند. این کامپوزیت‌ها که به کاربردهای سماتنه^۱ معروف هستند، به عنوان ابزار آلات برش و حفاری‌های چاه‌های نفت استفاده می‌شوند. هنگام تولید کاربردهای سماتنه، کبالت به صورت پودر مورد استفاده قرار می‌گیرد. پودر کبالت را می‌توان با روش‌های شیمیایی از طریق احیا با هیدروژن و یا با اتمیزه کردن کبالت مذاب، بدست آورد. ساختار کریستالی و شیمی پودر Co خالص با خواص کبالتی که به عنوان زمینه در کامپوزیت WC/Co به کار می‌رود، متفاوت است. آسیاب کاری و فرآوری از طریق فاز مایع یا فشرده سازی تحت دما و فشار بالا، می‌تواند بر روی شیمی زمینه کبالت نهایی تاثیرگذار باشد. کبالت خالص زیر دمای 1700°C به شکل HCP بوده و بالای این دما ساختار FCC پایدار است. مشخص شده است که در اثر انحلال کربن به دلیل وجود ذرات WC در کبالت در حین تولید کامپوزیت‌های WC/Co، ساختار FCC در

^۱ Cemented Carbide

دمای اتاق پایدار می‌شود. ساختار FCC دارای سیستم‌های لغزشی بیشتری است که این موضوع باعث داکتیلیته بالاتر آن می‌شود. در این کامپوزیت‌ها مقدار کمی زمینه CO، ذرات WC را در خود نگه داشته و از تلفیق آنها چقرمگی خوبی فراهم شده است که از تغییر شکل پلاستیک آن ممانعت به عمل می‌آورد.

۳-۴-۵) مس

مس دارای ساختار مکعبی وجوه مرکزدار می‌باشد. به دلیل ضریب هدایت الکتریکی بالای آن (از این نظر فقط عناصر طلا و نقره از مس برتر می‌باشند)، به طور گسترده‌ای به عنوان هادی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضمناً هدایت حرارتی این عنصر نیز مطلوب بوده که این امر سبب شده است تا گزینه مناسبی برای کاربرد در امر کنترل حرارت به شمار آید. مس را می‌توان به راحتی ریخته‌گری کرد و به دلیل داکتیلیته بالای آن، می‌توان آن را تحت کار مکانیکی قرار داد. یکی از اصلی‌ترین موارد کاربرد مس در کامپوزیت‌ها، ایفای نقش زمینه در ابررساناهای پایه نایوبیم می‌باشد. آلیاژهای مس - روی (برنج) و مس - قلع (برنز) از طریق محلول جامد سازی، مستحکم می‌شوند و جزو قدیمی‌ترین فلزات آلیاژی محسوب می‌گردند.

۳-۴-۶) نقره

نقره نیز فلزی با ساختار مکعبی وجوه مرکزدار است. این فلز دارای ضریب هدایت الکتریکی و حرارتی بسیار بالا، داکتیلیته بالا و مقاومت به خوردگی مطلوبی می‌باشد. از این فلز جدیداً به عنوان زمینه در ابررساناهای اکسیدی دما بالا بهره گرفته می‌شود.

۳-۴-۷) نیکل

نیکل نیز دارای ساختار FCC بوده که به آن داکتیلیته خوبی می‌دهد. نکته حائز اهمیت آن است که آلیاژهای نیکل، ترکیب فوق العاده‌ای از خواص را از خود بروز می‌دهند. سوپر آلیاژهای پایه نیکل (آلیاژهای نیکل - آهن - نقره)، در دمای بالا مقاومت

به خزش بسیار خوبی دارند که باعث شده است این آلیاژ، ماده مناسبی برای استفاده در تیغه‌های توربین محسوب شود.

۳-۴-۸) نایوبیم

هر چند که گاهی آلیاژهای نایوبیم به عنوان زمینه در کامپوزیت‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما در بیشتر موارد آنها را به عنوان الیاف در کامپوزیت‌های ابررسانا به کار می‌برند. توضیح مختصری از این مواد در بخش ۳-۵ ارائه خواهد شد.

۳-۴-۹) ترکیبات بین فلزی

ترکیبات بین فلزی هنگامی تشکیل می‌شوند که دو فلز غیرمشابه مطابق قوانین ظرفیت شیمیایی با یکدیگر ترکیب شوند. معمولاً پیوند در بین فلزی‌ها، از نوع فلزی نیست بلکه ماهیتی یونی یا کووالانسی دارد. چنین آلیاژی را در اصطلاح یک ترکیب بین فلزی می‌نامند (Villers و Calvert، ۱۹۸۵؛ Sauthoff، ۱۹۹۵).

ترکیبات بین فلزی عموماً دارای ترکیب استوکیومتری بوده و در دیاگرام فازی به شکل یک خط دیده می‌شوند. البته برخی از ترکیبات بین فلزی گستره‌ای از ترکیب را شامل می‌شوند. به طور کلی ترکیبات بین فلزی ساختار کریستالی پیچیده‌ای دارند و به دلیل داشتن پیوند یونی یا کووالانسی از ماهیت تردی برخوردار می‌باشند. در برخی از این ترکیبات، خواص منحصر به فردی همانند استحکام و سفتی مناسب در دمای بالا، چگالی کم و مقاومت به اکسیداسیون عالی، مشاهده می‌شود. به کارگیری این گونه مواد به عنوان زمینه در کامپوزیت‌ها، دمای کاری کامپوزیت را افزایش می‌دهد.

ترکیبات بین فلزی، می‌توانند ساختاری منظم یا نامنظم داشته باشند. آلیاژهای بین فلزی منظم دارای ساختاری با ویژگی نظم بلند دامنه می‌باشند؛ یعنی اتم‌های مختلف، مکان‌های خاصی را در شبکه اشغال می‌کنند. به دلیل ساختار منظم آنها، ناهمبندی‌ها در ترکیبات بین فلزی بسیار محدودتر از آلیاژهای نامنظم هستند. این امر باعث کاهش

نیافتن استحکام در دمای بالا (حتی در برخی موارد با افزایش استحکام) خواهد شد که امری بسیار مطلوب به شمار می‌آید. به طور مثال، آلومیناید نیکل تا 800°C افزایش چشمگیری در استحکام نشان می‌دهد. ویژگی نامطلوب ترکیبات بین فلزی، داکتیلیته بسیار پایین آنها در دمای اتاق است.

یکی از ترکیبات بین فلزی نامنظم دی سیلیسید مولیبدن (MoSi_2) است. این ترکیب نقطه ذوب بالایی داشته و پایداری خوبی در دماهای بالاتر از 1200°C در اتمسفر اکسیدی از خود نشان می‌دهد. این ترکیب بین فلزی معمولاً به عنوان المنت در کوره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت به اکسیداسیون بالای آن ناشی از یک لایه SiO_2 محافظ است که در دماهای بالا بر روی آن تشکیل می‌شود.

۳-۵) ابرسانایی

از آنجایی که یکی از کاربردهای مهم کامپوزیت‌های زمینه فلزی در ساخت کامپوزیت‌های ابرسانای رشته‌ای است، در این قسمت توضیح مختصری راجع به مواد مرتبط با پدیده ابرسانایی داده خواهد شد.

بعضی از فلزات و آلیاژها هنگام سرد شدن تا چند درجه مانده به صفر مطلق، تمامی مقاومت خود نسبت به جریان الکتریسیته را از دست می‌دهند. این پدیده ابرسانایی نامیده می‌شود و موادی که این پدیده در آنها دیده می‌شود، ابرسانا نام دارند. برخلاف فلزات معمولی، این ابرساناها می‌توانند چگالی بسیار زیادی از جریان را بدون هیچ گونه مقاومت الکتریکی حمل کنند. ابرساناها می‌توانند به طور بالقوه تقریباً ۱۰۰ برابر سیم‌های مسی یا آلومینیومی معمولی (با اندازه یکسان) جریان را انتقال دهند. از این مواد می‌توان در وسایلی همچون موتورها و ژنراتورها و نیز در انتقال الکتریسیته در خطوط قدرت بهره برد. ابرساناها می‌توانند میدان مغناطیسی بسیار

بزرگی تولید نمایند که این میدانها در فیزیک انرژی بالا^۱ و کاربردهای انرژی گناخت^۲، مورد استفاده زیادی دارند. از کاربردهای دیگر این مواد می‌توان به تصویرسازی از طریق رزونانس مغناطیسی (MRI)^۳، زئراتورهای مکتوهیدرودینامیک، ماشین‌های چرخان^۴، وسایل تقلیه مغناطیسی معلق و در کل آهنرباها اشاره کرد.

ابررساناهای معمولی (قدیمی) نیاز به سرد کردن در هلیوم مایع (4.2 K) دارند که روش بسیار گران قیمتی است. اما در سال ۱۹۸۶، دسته جدیدی از ابررساناهای سرامیکی کشف شدند که دمای بحرانی بالاتری از دمای نیتروژن مایع (۷۷ K) داشتند. این مواد ابررساناهای دما بالا نام گرفتند و پدیده مذکور به ابررسانایی دما بالا (HTS)^۵ معروف شد. بر خلاف ابررساناهای دما پایین که فلزی یا نیمه فلزی هستند، این ترکیبات جدید سرامیکی هستند. اولین HTS کشف شده دارای دمای بحرانی ۳۵ K (-۲۳۸°C) بود. پس از آن، در سال ۱۹۸۷ ترکیب دیگری که در ۹۴ K (-۱۹۷°C) ابررسانا می‌شد، کشف گردید. از آنجایی که این ترکیب را می‌توان با نیتروژن مایع ارزان و قابل دسترس‌تر بدست آورد، این کشف از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بود. این روند با کشف ترکیبات پایه بیسموت پی گیری شد. پس از آن نیز ترکیبات پایه تالیوم و پایه ایتربیم با دمای بحرانی بالاتر کشف شدند. ابررساناهای دما بالا می‌توانند در دمایی حدود ۱۴۰ K (-۱۳۳°C) کار کنند. این امر اجازه می‌دهد تا عمل سرد شدن آنها که در نیتروژن مایع انجام می‌شود، نسبت به ابررساناهای دما پایین که برای سرد شدن به هلیوم مایع نیاز دارند، اقتصادی‌تر و با راندمان بالاتری انجام شود. در سال ۲۰۰۱، ابررسانای دما پایین دیگری با ترکیب MgB_2 کشف شد (Nagamatsu).

^۱ High Energy Physics

^۲ Fusion Energy

^۳ Magnetic Resonance Imaging

بزرگی تولید نمایند که این میدان‌ها در فیزیک انرژی بالا^۱ و کاربردهای انرژی گداخت^۲، مورد استفاده زیادی دارند. از کاربردهای دیگر این مواد می‌توان به تصویرسازی از طریق رزونانس مغناطیسی (MRI)^۳، ژنراتورهای مگتوهیدزودینامیک، ماشین‌های چرخان^۴، وسایل نقلیه مغناطیسی معلق، و در کل آهنرباها اشاره کرد.

ابررساناهای معمولی (قدیمی) نیاز به سرد کردن در هلیوم مایع (۴/۲ K) دارند که روش بسیار گران قیمتی است. اما در سال ۱۹۸۶، دسته جدیدی از ابررساناهای سرامیکی کشف شدند که دمای بحرانی بالاتری از دمای نیتروژن مایع (۷۷ K) داشتند. این مواد ابررساناهای دما بالا نام گرفتند و پدیده مذکور به ابررسانایی دما بالا (HTS)^۵ معروف شد. بر خلاف ابررساناهای دما پایین که فلزی یا نیمه فلزی هستند، این ترکیبات جدید سرامیکی هستند. اولین HTS کشف شده دارای دمای بحرانی ۳۵ K (۱۹۷°C-) بود. پس از آن، در سال ۱۹۸۷ ترکیب دیگری که در ۹۴ K (۱۹۷°C-) ابررسانا می‌شد، کشف گردید. از آنجایی که این ترکیب را می‌توان با نیتروژن مایع ارزان و قابل دسترس‌تر بدست آورد، این کشف از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بود. این روند با کشف ترکیبات پایه بیسموت پی گیری شد. پس از آن نیز ترکیبات پایه تالیم و پایه ایتیریم با دمای بحرانی بالاتر کشف شدند. ابررساناهای دما بالا می‌توانند در دمایی حدود ۱۴۰ K (۱۳۳°C-) کار کنند. این امر اجازه می‌دهد تا عمل سرد شدن آنها که در نیتروژن مایع انجام می‌شود، نسبت به ابررساناهای دما پایین که برای سرد شدن به هلیوم مایع نیاز دارند، اقتصادی‌تر و با راندمان بالاتری انجام شود. در سال ۲۰۰۱، ابررسانای دما پایین دیگری با ترکیب MgB_2 کشف شد (Nagamatsu).

^۱ High Energy Physics

^۲ Fusion Energy

^۳ Magnetic Resonance Imaging

^۴ Rotating Machines

^۵ High Temperature Superconductivity

(۲۰۰۱). دمای بحرانی آن 39 K است که فقط کمی بیش از دمای بحرانی ابررساناهای فلزی پایه نایوبیم است.

آلیاژهای نایوبیم / تیتانیم یکی از مهمترین ابررساناهای دما پایین محسوب می‌شوند. ابررساناهای دما پایین به منظور ابررسانا شدن باید تا زیر 20 K سرد شوند. این مواد به طور گسترده در دستگاه‌های تصویرسازی از طریق رزونانس مغناطیسی، فیزیک انرژی بالا و گداخت هسته‌ای کاربرد دارند. استفاده تجاری زیاد از این گونه مواد به دلیل هزینه‌های بالای تبرید آنها، محدود شده است. این هزینه زیاد عمدتاً به دلیل استفاده از هلیوم مایع جهت سرد کردن مواد تا چنین دماهای پایینی می‌باشد.

۳-۵-۱) انواع ابررساناها

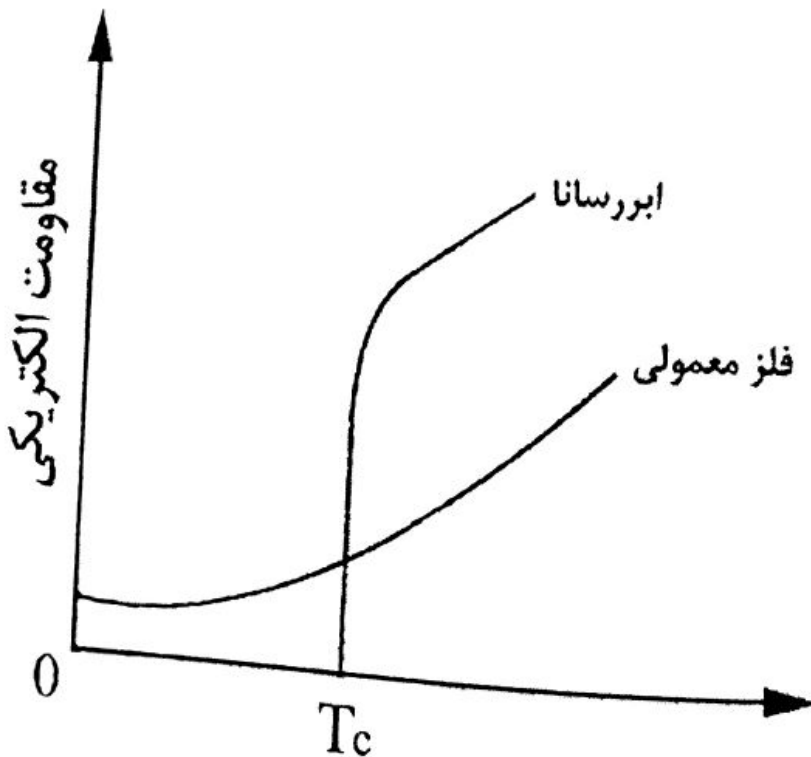
پدیده ابررسانایی در سال ۱۹۱۱ توسط Onnes در عنصر جیوه کشف گردید. از آن به بعد بسیاری از عناصر به همراه صدها گونه محلول جامد یا ترکیب کشف شدند که این پدیده از بین رفتن مقاومت الکتریکی زیر دمای بحرانی را از خود بروز می‌دادند. شکل ۳-۶ تغییرات مقاومت الکتریکی را با دما در یک فلز معمولی و یک ابررسانا مقایسه می‌کند. T_c دمای بحرانی نامیده می‌شود و برای هر ماده‌ای، یک مقدار ثابت و مشخصی می‌باشد که بالای این دما ماده به هادی معمولی تبدیل می‌شود. هنگامی که روش‌هایی به منظور قرار دادن مواد ابررسانا به شکل رشته‌های بسیار نازک در زمینه‌ای از مس ابداع شده و گسترش یافتند، ابررساناها توانستند خود را به ثبات اقتصادی برسانند.

از لحاظ صنعتی، مهمترین خاصیت ابررساناها، توانایی آنها در انتقال جریان الکتریسیته بدون افت معمولی، RI^2 (جریان بر حسب آمپر و R مقاومت بر حسب اهم می‌باشد)، تا رسیدن به چگالی جریان بحرانی، J_c ، می‌باشد. این جریان بحرانی تابعی از میدان اعمالی و دماست. ابررساناهای تجاری بدست آمده در دهه ۱۹۸۰، چگالی جریان بحرانی $J_c > 10^6\text{ A cm}^{-2}$ را در دمای $4/2\text{ K}$ و میدان اعمالی ۵ تسلا

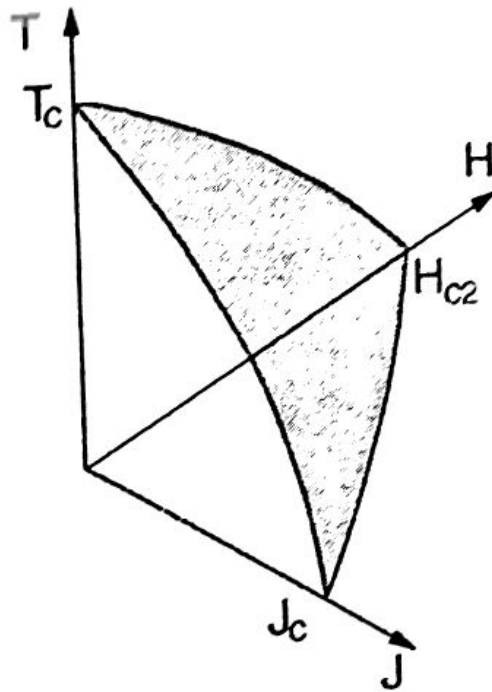
ارائه می نمودند. سه پارامتر وجود دارند که خواص یک ابررسانا را محدود می سازند که عبارتند از دمای بحرانی (T_c)، چگالی جریان بحرانی (J_c) و میدان مغناطیسی بحرانی (H_c). در شکل ۳-۷ تقابل این پارامترها را می توان مشاهده نمود. تا زمانی که ماده، سطح خاکستری رنگ را قطع نکرده است، رفتار ابررسانا خواهد داشت.

دو گونه ابررسانا وجود دارد :

- نوع اول : این دسته مواد با مقادیر کم T_c شناخته می شوند و خاصیت ابررسانایی خود را به طور ناگهانی در H_c از دست می دهند.
- نوع دوم : این مواد تا رسیدن به H_{c2} همانند مواد دیامغناطیس عمل می کنند. در مقادیر بالاتر از آن، میدان مغناطیسی به تدریج در ماده نفوذ کرده و به همراه آن ابررسانایی به تدریج افت می کند تا اینکه در میدان مغناطیسی بحرانی H_{c2} ، ماده به حالت معمولی خود باز می گردد. در اغلب کاربردها از نوع دوم ابررساناها استفاده می شود.



شکل ۳-۶ : مقایسه تغییرات مقاومت الکتریکی با دما در یک فلز معمولی و یک ماده ابررسانا.



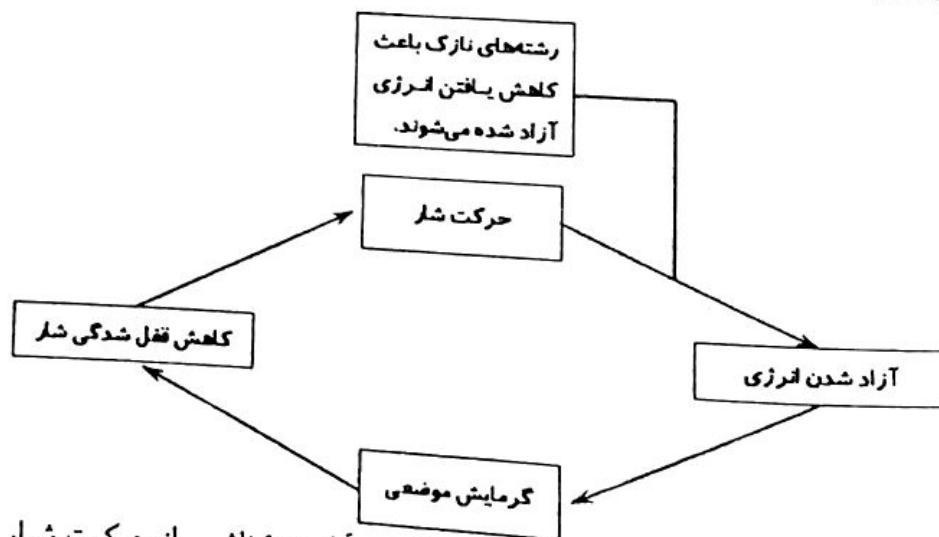
شکل ۳-۷: حالت ابررسانایی که توسط سه پارامتر بحرانی توصیف می‌شود: دمای بحرانی (T_c)، چگالی جریان بحرانی (J_c) و میدان مغناطیسی بحرانی (H_c) تا زمانی که ماده، سطح خاکستری رنگ را قطع نکرده است، رفتار ابررسانا خواهد داشت.

۳-۵-۲) شار و قفل شدگی شار^۱

هنگامی که خطوط میدان مغناطیسی (موسوم به خطوط شار) حاصل از یک میدان مغناطیسی قوی، در سطح یک ابررسانای نوع دوم نفوذ نمایند، حالتی به نام شار-تسکه^۲ زوی می‌دهد. این شبکه متناوب حاوی مناطقی حلقوی از خطوط شار بوده و از ایجاد معان‌های مغناطیسی کوچک در هر کدام از خطوط جریان جلوگیری می‌نماید. این خطوط یکدیگر را دفع می‌کنند و خود را به حالت منظمی که معمولاً چیدمان متراکم هگزاگونال است، در می‌آورند. از آنجا که حرکت شار، که گاهی شار-خزش^۳ نامیده می‌شود، فرآیندی است که انرژی آزاد می‌کند یا به عبارت دیگر در اثر انجام آن گرما تولید می‌شود، در ابررساناها به قفل شدن شار نیاز می‌باشد. هر گونه اختلال در

^۱ Flux and Flux-Pinning
^۲ Flux-Lattice
^۳ Flux-Creep

یک ابررسانا، از طریق حرکت یا تغییر میدان اعمالی، منجر به آرایش مجدد خطوط شار مغناطیسی در آن می‌شود. حرکت شار در یک ابررسانا، صرف نظر از منبع حرکت شار، باعث افزایش دما خواهد شد. این امر نیز خود سبب کاهش جریان بحرانی و افزایش حرکت شار می‌گردد. نتیجه آن است که ابررسانا تا بالاتر از T_c گرم می‌شود و به حالت معمولی خود باز می‌گردد. یک راه حل عملی برای این مشکل، ساخت ابررسانا به شکل رشته‌های بسیار نازک است زیرا در این صورت مقدار انرژی (گرما) آزاد شده در اثر حرکت شار، بسیار کوچک خواهد بود (شکل ۳-۸). قفل شدن شار از طریق عیوب موجود در ساختار کریستالی ابررسانا مثل مرز دانه‌ها یا ناخالصی‌ها، رخ می‌دهد. زمینه‌ای از نقره یا مس با خلوص زیاد، مسیری متناوب با رسانایی بالا برای جریان فراهم می‌آورد. در حالت بازگشت (یعنی وقتی ابررسانا به حالت معمولی خود باز گردد)، زمینه فلزی بدون آنکه زیاد از حد گرم شود، جریان را حمل می‌نماید. ابررسانا دوباره تا زیر دمای T_c سرد می‌شود و دوباره جریان الکتریکی را حمل می‌کند که پایداری تبریدی^۱ خوانده می‌شود؛ یعنی ابررسانا در کسر حجمی زیادی از فلز زمینه با مقاومت پایین قرار می‌گیرد و یک ماده خنک کننده نیز در تماس با همه سیم پیچ‌ها موجود می‌باشد.

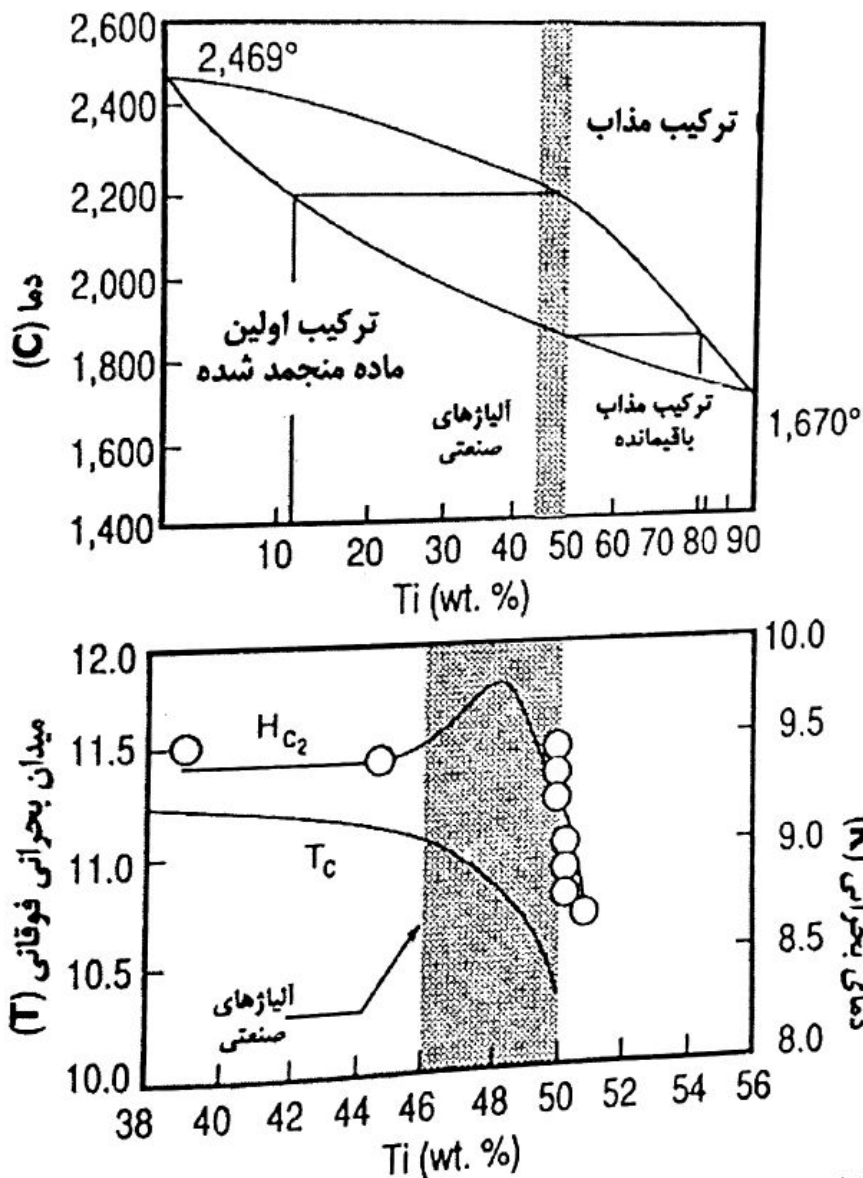


شکل ۳-۸: مفهوم طرح پایداری تبریدی: رشته‌های نازک، انرژی آزاد شده ناشی از حرکت شار مغناطیسی را کاهش می‌دهند.

^۱ Cryogenic Stability

۳-۵-۳) آلیاژهای داکتیل: آلیاژهای نایوبیم-تیتانیم

آلیاژهای نایوبیم-تیتانیم، تلفیق بسیار خوبی از خواص ابررسانایی و خواص مکانیکی را فراهم می‌آورند. برخی از ترکیبات تجاری موجود از این آلیاژ عبارتند از: Nb-۴۴٪Ti در انگلستان، Nb-۴۷/۵٪Ti در آمریکا، و Nb-۵۰٪Ti در آلمان. شکل ۳-۹ دیاگرام فازی Nb-Ti و نمودار دمای بحرانی و فوق بحرانی را بر حسب ترکیب آلیاژ نشان می‌دهد. گستره مشخص شده در شکل (۵۰-۴۶ wt.٪ Ti) به آلیاژهای ابررسانا تعلق دارد.



شکل ۳-۹: (الف) دیاگرام فازی Nb-Ti و (ب) دمای بحرانی و فوق بحرانی بر حسب ترکیب آلیاژ؛ توجه شود که محدوده مشخصی (۴۶ تا ۵۰٪ تیتانیم) مربوط به آلیاژهای ابررسانا می‌باشد.

در همه این آلیاژها، با استفاده از ترکیب مناسب کار مکانیکی و عملیات آنیل، می‌توان در $4/2\text{ K}$ و میدان اعمالی 7 تسلا ، به $J_c > 1000\text{ A mm}^{-2}$ دست یافت. در این آلیاژها قفل شدگی محکم شار و در نتیجه J_c زیادی، به وسیله رسوبات و دیواره‌های سلول نابجایی، بدست می‌آید. قفل شدگی شار توسط رسوبات در آلیاژهای با Ti زیاد اهمیت پیدا می‌کند زیرا دیاگرام فاز $Nb-Ti$ ، رسوب $\alpha-Ti$ را در این نوع آلیاژها نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، شرایط پایداری در مقابل حرکت شار به این نیاز دارد که ابررسانا به شکل یک سیستم کامپوزیتی ساخته شود. رشته‌های بسیار نازک ابررسانایی که در زمینه مس قرار داده می‌شوند، پایداری شار مطلوبی را فراهم آورده و افت ناشی از تغییر میدان مغناطیسی را کاهش می‌دهند.

۳-۵-۴) ابررساناهای $Nb_3Sn : A-15$

برای کاربردهایی که با میدان‌های بیش از 12 تسلا سر و کار دارند، ترکیبات بین فلزی منظم و دارای ساختار کریستالی $A-15$ ، بهتر از نوع $Nb-Ti$ می‌باشند. ترکیب Nb_3Sn دارای T_c حدود 18 K است. از آن حیث که T_c بالاتر باعث کاهش هزینه تبرید می‌شود، این ترکیب مناسب‌تر به نظر می‌رسد. در ضمن Nb_3Sn ، ابررسانایی با گستره کاربرد وسیع‌تر در دماها و میدان‌های بالا به شمار می‌رود. یکی از عیوب بارز این ترکیب بین فلزی، تردی بیش از حد آن است (نوعاً کرنش شکست $0/2\%$ به همراه پلاستیسیته بسیار کم). حال این ماده را با $Nb-Ti$ که می‌تواند با کاهش سطح مقطع بیش از 90% کار سرد شود، مقایسه کنید. در ابتدا این ترکیب به شکل سیم یا نوارهای تسمه‌ای ساخته شد. روش ساخت آن نفوذ دادن قلع به داخل زیرلایه تسمه‌ای شکل نایوبیم و یا رسوب شیمیایی بخار بود. ترکیب V_3Ga نیز بر روی تسمه وانادیمی به همین شکل ساخته شد. معایب عمده این ابررساناهای تسمه‌ای عبارت بودند از: الف) ناپایداری شار به دلیل ابعاد وسیع هندسه تسمه و ب) انعطاف پذیری محدود در جهت عرض تسمه. بعدها با توجه به این واقعیت که استفاده از ابررساناها به شکل رشته‌های

بسیار نازک باعث حصول پایداری شار می‌شود، روش کامپوزیت سازی رشته‌ای منجر به ساخت ابررسانای 15-A شد. این تغییر عمده که شامل ورود کامپوزیت به دنیای ابررساناها بود، از اوایل دهه ۱۹۷۰ به وقوع پیوست. Tachikawa (۱۹۷۰) نشان داد که V_3Ga را می‌توان روی رشته‌های وانادیم در زمینه‌ای از Cu-Ga تولید نمود. Kaufmann و Pickett (۱۹۷۰) نیز ترکیب Nb_3Sn را روی رشته‌های نایبیم در زمینه‌ای از برنز (Cu-Sn) بدست آوردند. تولید برخی سیستم‌های کامپوزیتی ابررسانا در فصل ۴ و کاربردهای آنها در فصل ۱۱ توضیح داده شده است.

مراجع

- Chawla, N., J.J. Williams, and R. Saha. (2002) Metall. Mater. Trans., 33A, 3861.
 Ganesh, V.V., and N. Chawla. (2004) Metall. Mater. Trans., 35A, 53-62.
 Hillmann, H.. (1981) in Superconductor Materials Science, Plenum, New York, p. 275.
 Kaufmann, A.R., and J.J. Pickett, (1970) Bull. Am. Phys. Soc., 15, 833.
 Kunzler, J.E., E. Bachler, F.S.L. Hsu, and J.E. Wernick, (1961) Phys. Rev. Lett., 6, 89.
 Meyers, M.A., and K.K. Chawla, (2005) Mechanical Behavior of Materials, 2nd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
 Nagamatsu, J., N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, (2001) Nature, 410, 63.
 Sauthoff, G., (1995) Intermetallics, VCH Publishers, New York, NY.
 Smithells Metals Reference Book, (1976) Butterworths, Boston, p. 944.
 Tachikawa, K., (1970) in Proceedings of the 3rd ICEC, Illife Science and Technology Publishing, Surrey, U.K.
 Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases, (1985), vol. 1,2,3, P. Villers and L.D. Calvert (eds.), ASM, Metals Park, OH.