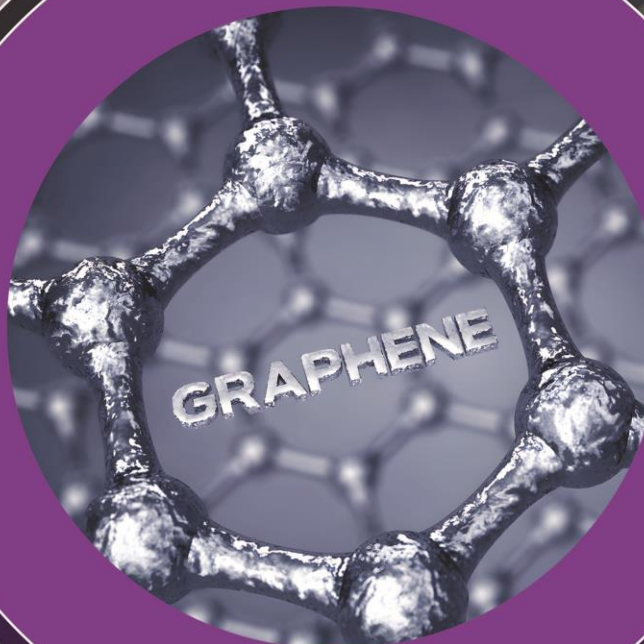


پودر

نشریه انجمن علمی دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی



در این شماره مطالبی راجع به انجماد جهت دار،
عملیات ثانویه کوره های پاتیلی، کامپوزیت های
کربن، نانو مواد و مهندسی پودر خواهید خواند.

- شعر..... ۲
- انجماد جهت دار در سوپر آلیاژ پایه نیکل..... ۳
- عملیات ثانویه در کوره های پاتیلی..... ۱۱
- خواص و کاربردهای کامپوزیت های کربن - کربن..... ۱۵
- نانو مواد..... ۲۳
- آشنایی با برقگیر و عملکرد آن..... ۲۷



دانشگاه شهید چمران اهواز



دانشگاه شهید چمران اهواز

مدیر مسئول: محمد مزبانی پور

سر دبیران: محمد مزبانی پور - میکائیل شیرالی

ویراستار نگارشی و علمی: محمد مزبانی پور

طراحی جلد: مهدی جمشیدی

ارتباط با نورده:

Navardjournal.scu@gmail.com

با تشکر از: معاونت فرهنگی و اجتماعی

دانشگاه شهید چمران اهواز - خانم موزرم نیا

کارشناس نشریات دانشگاه

شعر

ای دل، ز علم مواد، گشتی تو حیران، دریاچه‌ای است این دانش، بی‌کران
از اتم و بلور، تا ساختار پیچیده، هر ذره‌ایست رازی، در این جهانِ عریان
متالورژی، فن استخراج زر و سیم، ز خاک تیره، گوهرهای رخشان
آلیاژها سازیم، با خواص گوناگون، مقاوم و سبک، برای هر زمان و مکان
ز دل زمین، گنج‌ها برون کشیم، با دانش و تدبیر، سازیم جهان را چنان
مهندسی مواد، علم عصرِ نوین، با خلاقیت و نوآوری، گردد جهان گلستان
نانو مواد، دنیایِ کوچکِ بزرگ، خواص بی‌نظیر، در خدمتِ انسان
بیوتکنولوژی، علم زیست و مواد، درمان هر دردی، ز انسان تا حیوان
مهندسی مواد، پلی است میانِ علوم، ز فیزیک و شیمی، تا دانش کیهان
پس همت کن ای دوست، بخوان و بیاموز، تا در این راه پرفراز، گردی تو قهرمان
با علم و عمل، جهان را کنیم آباد، مهندسی مواد، رمز پیشرفتِ دوران

شعر از هنرمند نگار (Gemini)

انجماد جهت‌دار در سوپر آلیاژ پایه نیکل

۱- مقدمه

نیکل با عدد اتمی ۲۸ در گروه دهم و دوره چهارم جدول تناوبی قرار دارد و دارای خواص کلی بسیار مناسب و کاربردهای وسیعی است. این فلز دارای ساختار FCC است و به همین دلیل شکل‌پذیری بسیار خوبی دارد. در کنار شکل‌پذیری، استحکام و چقرمگی بالایی نیز دارد. نیکل به‌صورت خالص دارای خواص خوبی است اما برای دستیابی به خواص بهتر، آلیاژهایی بر پایه نیکل تهیه شده است. آلیاژهای نیکل را اغلب با مقاومت به خوردگی عالی و مقاومت به تغییر شکل حتی در دماهای بالا شناخته می‌شوند؛ این درحالیست که آلیاژهای نیکل شامل گروه‌ها و گریدهای بسیار متنوعی بوده و بسته به ترکیب شیمیایی و روش تولید، گستره خواص وسیعی دارند.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل، دسته‌ای از آلیاژهای پایه نیکل‌اند که خواص خارق‌العاده‌ای نسبت به سایر فلزات دارند. علت این خواص ویژه در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این آلیاژها بسیار گران‌قیمت هستند و تنها در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که جایگزین دیگری برای آنها نباشد؛ چنین شرایطی معمولاً در صنایع استراتژیک مانند موتور جت‌ها، توربین‌های گازی توان بالا، صنایع هسته‌ای، صنایع هوافضا و نظیر آنها وجود دارد. از اواخر قرن گذشته، از درون همین صنایع استراتژیک، صناعی با تکنولوژی بالاتری با هدف ارتقای خواص سوپرآلیاژها پدید آمد. در این صنایع تکنولوژی‌بالا (High tech) قطعاتی از جنس سوپرآلیاژهای نیکل به روشی‌هایی معروف به **انجماد جهت‌دار** تولید شد که خواص به مراتب بهتری نسبت به قطعات تولید شده به روش‌های عادی داشت. برای مثال پره‌های توربین گازی تولید شده به روش انجماد جهت‌دار امکان انجام سرویس در دماهای بالاتری نسبت به پره‌های معمولی دارند و این به معنای بازدهی بالاتر در تولید است. بهبود عملکرد قطعات در این روش تولید به دلیل ریزساختار و دانه‌بندی قطعات است؛ به‌گونه‌ای که هرچه آلیاژ از ساختار دانه‌های هم‌محور فاصله گرفته و به ساختار تک‌بلوری نزدیک شود، عملکرد دمای بالای آن بهبود می‌یابد. بهترین عملکرد در یک تک‌بلور است. منظور از عملکرد دمای بالا همان رفتار خزشی است. در دماهای بالا خطر خوردگی نیز دوچندان می‌شود؛ اما معضل خوردگی با انتخاب ترکیب شیمیایی و پوشش‌های درست تا حدود زیادی حل شده است درحالی‌که بهبود مقاومت به خزش در شرایط سرویس بسیار سخت مانند موتور جت‌ها، آنچه که از ترکیب شیمیایی مهم‌تر است، کنترل ریزساختار و روش انجماد و همچنین عملیات حرارتی است.

هدف از این تحقیق، بررسی اهمیت انجماد جهت‌دار و چگونگی اثر آن بر بهبود خواص دما‌بالای قطعات است.

۲- آلیاژهای نیکل

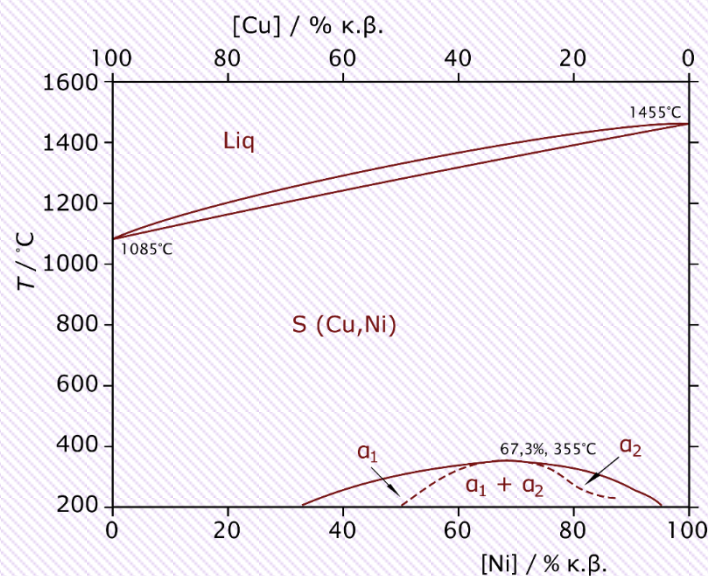
آلیاژهای نیکل دسته مهمی از مواد مهندسی به شمار می‌روند و شامل سری‌های متنوع با خواص و کاربردهای وسیعی هستند. در ادامه به مهم‌ترین گروه‌های این آلیاژها اشاره می‌شود.

۱-۲ نیکل خالص تجاری

معمولاً با خلوص بیشتر از ۹۹٪ Ni در بازارها عرضه می‌شود؛ هرچند می‌توان به خلوص‌های بالاتر (در حد ۹۹٫۹۹٪) نیز رسید؛ اما به علت دشواری کار و هزینه‌های بالا تنها در کاربردهای بسیار خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیکل خالص تجاری دارای حدود نیم درصد کبالت و گاهی در حدود صدم درصد از عناصر دیگری مانند آهن، منگنز، مس، منیزیم، سیلیسیم و کربن می‌باشد. آلیاژهای سری ۲۰۰ مانند آلیاژهای ۲۰۱، ۲۰۰، ۲۷۰ و ... از این دسته هستند. نیکل خالص تجاری دارای قابلیت کار سرد بسیار خوب و رسانندگی حرارتی عالی است.

۲-۲ آلیاژهای نیکل - مس (مونل)

به‌طور کلی مونل حاوی $\frac{2}{3}$ وزنی نیکل و $\frac{1}{3}$ وزنی مس می‌باشد؛ البته این نسبت می‌تواند بر حسب کاربرد و خواص مورد نیاز تغییر کند. نیکل و مس با هر نسبتی در هم حل می‌شوند؛ این را می‌توان از دیاگرام فازی Cu-Ni که در شکل ۱ آمده است نیز مشاهده نمود.



شکل ۱- دیاگرام تعادلی مس - نیکل

آلیاژهای ۴۰۰، ۴۰۴، R-۴۰۵ و K-۵۰۰ از این دسته هستند. مونل‌ها به‌طور کلی دارای شکل‌پذیری عالی هستند و به راحتی اکستروود می‌شوند از این رو یکی از کاربردهای مهم آنها در تولید انواع تیوب‌هاست.

۲-۳- آلیاژهای نیکل - کروم

کروم یکی از عناصر مهم در آلیاژهای پایه نیکل است که مقاومت به خوردگی بسیار بالایی دارد. محلول جامد کروم در نیکل در دمای اتاق می‌تواند حاوی حدود ۳۰٪ وزنی کروم باشد که حلالیت بالایی به شمار می‌رود. نیکل به تنهایی دارای مقاومت به خوردگی بسیار خوبی است اما با افزودن کروم و ایجاد لایه محافظ اکسیدی محافظ، این مقاومت دوچندان شده و در دماهای بالاتر حفظ می‌شود. در کنار کروم از آلومینیم نیز به عنوان عنصر آلیاژی استفاده می‌شود. Al علاوه بر کمک در تشکیل لایه محافظ، امکان ایجاد برخی ترکیبات بین فلزی را فراهم می‌کند. این ترکیبات ریز در زمینه توزیع یافته و موجب افزایش استحکام می‌شوند. اینکونل‌های ۶۰۰، ۶۰۱ و ۶۲۵ از این دسته به شمار می‌آیند.

۲-۴- سوپرآلیاژهای پایه نیکل

سوپرآلیاژها یا همان ابرآلیاژها را به‌خاطر خواص فوق‌العاده آنها و امکان سرویس‌دهی در شرایط کاری سخت نظیر دمای بالا و محیط‌های خورنده، به این نام می‌شناسند. این آلیاژها دارای ترکیبات پیچیده هستند و به طرز شگفت‌انگیزی در اکثر شرایط تاب‌آوری بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند. از خواص اصلی آنها می‌توان به مقاومت در برابر خزش اشاره کرد. به‌طور کلی سوپرآلیاژها به سه قسمت: سوپرآلیاژهای پایه نیکل، سوپرآلیاژهای پایه نیکل - آهن و سوپرآلیاژهای پایه کبالت.

اولین سوپرآلیاژ پایه نیکل در سال ۱۹۴۱ در بریتانیا به نام نایمونیک ۸۰ توسعه پیدا کرد. ترکیب اصلی این آلیاژ حاوی ۲۰٪ Cr به همراه ۲۵٪ Ti و ۱٪ Al بود که در طول سال‌ها با افزودن عناصر دیگر نظیر مولیبدن، کبالت، کلومبیم (نام سابق نیوبیم)، بور، آهن و... تکامل یافت.

استحکام در این آلیاژها و بسیاری از آلیاژهای پایه نیکل به‌خصوص سوپرآلیاژها بر پایه رسوبات $Ni_3(Al, Ti)$ می‌باشد.

وسیع‌ترین کاربرد سوپرآلیاژهای پایه نیکل در صنایع هواپیما و توربین‌های گازی است. همچنین در راکتورهای هسته‌ای، زیردریایی‌ها، دیگ‌های بخار (Boiler)، تجهیزات پتروشیمی و سایر کاربردهای دما بالا مورد استفاده هستند. امروزه بالغ بر ۱۰۰ نوع سوپرآلیاژ پایه نیکل کارشده و ریختگی توسعه یافته است.

فازهای اصلی موجود در سوپرآلیاژهای پایه نیکل عبارت‌اند از:

۱- فاز گاما (γ): زمینه پیوسته آستینی FCC

۲- فاز گاما پرایم (γ'): فاز رسوبی

۳- کاربیدها: انواع مختلف کاربیدها و اساساً به صورت $M_{23}C_6$ و MC هستند (که M یک فلز است).

آلیاژهای اینکونل ۷۳۸، نایمونیک ۱۰۵ و MAR-M ۲۰۰ چند نمونه از سوپرآلیاژهای پایه نیکل هستند.

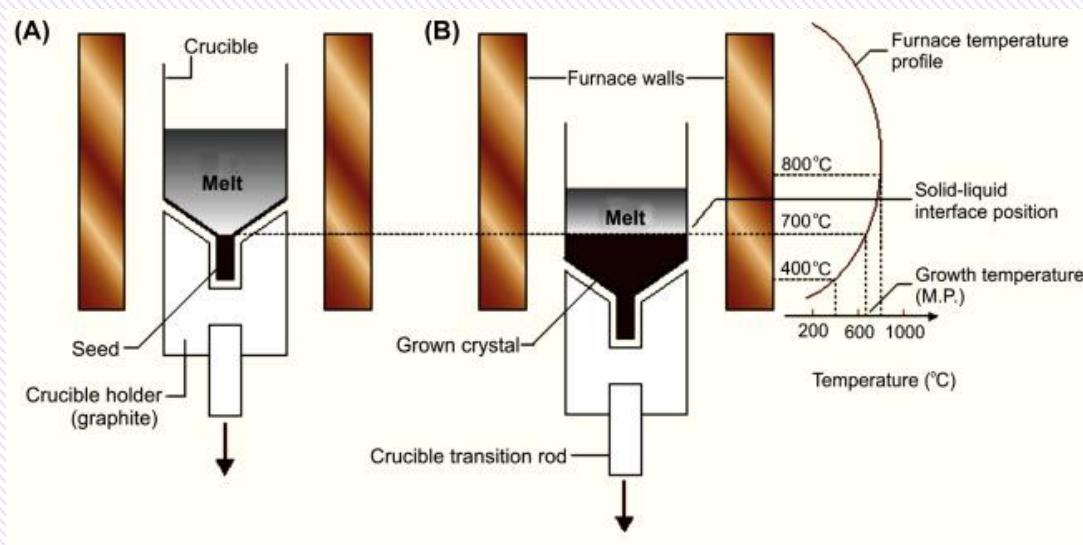
۳- انجماد جهت‌دار

انجماد جهت‌دار روشی است که شرایط انجمادی به‌گونه‌ای طراحی و کنترل می‌شود تا پیشرفت جبهه انجماد تنها به یک سو باشد. هدف از انجماد جهت‌دار جلوگیری از حاصل شدن ریزساختار دانه‌های هم‌محور است. ریزساختار حاصل شده بسته به شرایط انجمادی می‌تواند دانه‌های ستونی و یا تک کریستال باشد. سوپرآلیاژهای پایه نیکل برای انجام سرویس در دماهای بالا طراحی شده‌اند؛ اما در دهه‌های برخی کاربردهای استراتژیک ظاهر شده است که دمای کاری آنها به قدری بالاست که حتی سوپرآلیاژهای پایه نیکل بسیار مستحکم نیز توانایی تاب‌آوری در چنین شرایطی را ندارند؛ چراکه دچار خزش شدید می‌شوند. برای به حداقل رساندن خزش در شرایط فوق، پیشنهاد شده است قطعات به تک کریستال ریخته‌گری شوند؛ زیرا مرزدانه‌ها در دماهای بسیار بالا (بالتر از دمای هم استحکامی)، محل‌های ضعف هستند و ساختار دچار لغزش مرزدانه‌ای (GBS) می‌شود.

۳-۱- روش بریجمن - استاک بارگر

یکی از روش‌های معروف انجماد جهت‌دار، روش بریجمن - استاک بارگر است. در این روش کوره و شرایط انجمادی به‌گونه‌ای طراحی می‌شود تا یک شیب حرارتی در قالب ایجاد شود. شیب حرارتی موجب می‌شود پیشروی انجماد تنها در یک جهت باشد و ساختار انجمادی مطلوب ایجاد گردد. عامل اصلی کنترل‌کننده انجماد جهت‌دار همان شیب حرارتی است؛ بنابراین هدف از طراحی یک سیستم انجمادی جهت تهیه یک ساختار تک کریستالی آن است که سیستم امکان ایجاد یک شیب حرارتی با دقت بالا داشته باشد. طبیعتاً ایجاد چنین سیستم‌هایی به خصوص در ابعاد بزرگ‌تر، به سادگی میسر نیست و تنها کشورهای معدودی در جهان به این تکنولوژی دست‌یافته‌اند.

یک شماتیک کلی نمونه‌ای از کوره بریجمن با قالب متحرک، در شکل ۲ آمده است. اجزای اصلی قابل مشاهده در شکل عبارت‌اند از کوئل‌های حرارتی، دیواره‌های کوره، بوته و قالب، شارژ، نگهدارنده بوته و محوری که بوته و قالب روی آن حرکت می‌کنند.



شکل ۲- اجزای یک کوره بریجمن - استاک بارگر

در ابتدا شارژ درون بوته قرار گرفته و سپس خلأ اعمال می‌گردد. بعد از آن منبع تغذیه فعال شده و کویل‌های حرارتی داغ می‌شوند. دیواره‌های رسانا که میان کویل‌ها و بوته قرار دارند، موجب توزیع یکسان حرارت درون فضای کوره می‌شوند. پس از رسیدن دمای کوره به حد مطلوب و ذوب کامل شارژ، بوته شروع به حرکت کرده و به با یک سرعت مشخص از فضای داغ کوره بیرون کشیده می‌شود. این حرکت خطی باعث ایجاد یک گرادیان حرارتی در طول قالب شده و عامل انجماد جهت‌دار است. برای اطمینان از شروع سالم انجماد، یک جوانه اولیه به صورت مصنوعی در کف قالب قرار داده می‌شود تا انجماد از آن نقطه شروع و ادامه یابد.

۲-۳ مطالعه موردی بر سوپرآلیاژ CMSX-۴

یک مطالعه موردی بر روی انجماد تک کریستال سوپرآلیاژ CMSX-۴ توسط آقای علیرضا میرک و همکاران انجام شده است. هدف از آن ارزیابی و مقایسه ساختار و خواص مکانیکی دو نمونه تک کریستال و پلی کریستال از این سوپرآلیاژ است.

در این پژوهش، از سوپرآلیاژ CMSX-۴ که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است، دو نمونه یکی به صورت پلی کریستال و دیگری به روش کوره بریجمن به صورت تک کریستال، تهیه شد.

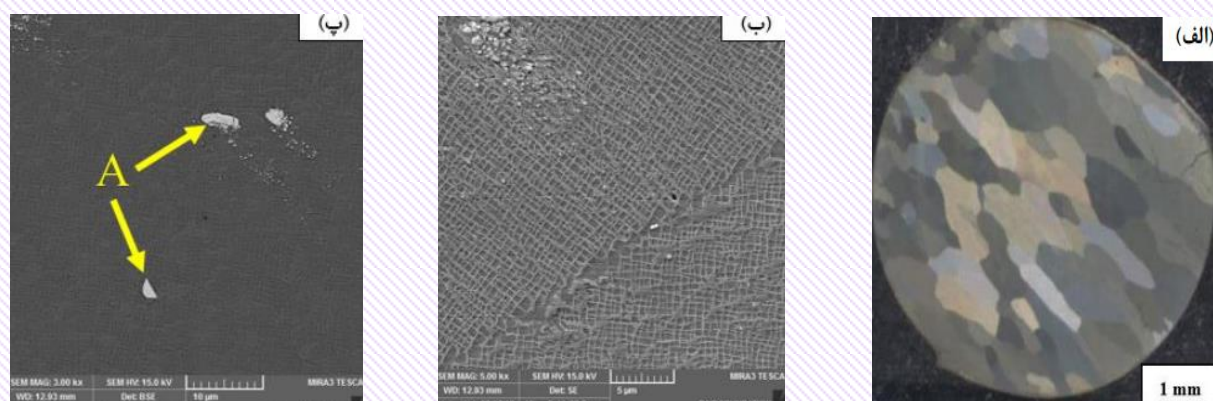
جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه‌های سوپرآلیاژ CMSX-۴

Mo	Ta	Re	W	Hf	Cr	Al	Ti	Ni
۰/۵۹	۶/۴۸	۲/۹۲	۶/۳۵	۰/۱۱	۶/۵۱	۵/۵۸	۰/۹۸	Base
N	O	S	P	C	Mn	Fe	Si	Co
۷ ppm	۱۸ ppm	۳ ppm	۷۰ ppm	۳۰ ppm	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۰۴	۹/۴۵

برای تهیه نمونه تک کریستال، سرعت خروج قالب از کوره بریجمن ۳ میلی‌متر بر دقیقه بود؛ سپس نمونه‌های آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E۸/E۸M از دو نوع تک کریستال و پلی کریستال تهیه شد. بعد از آن طی چند سیکل تحت عملیات حرارتی آنیل انحلالی و پیرسازی از دمای ۸۷۰ تا ۱۳۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

۱-۲-۳- ریزساختار

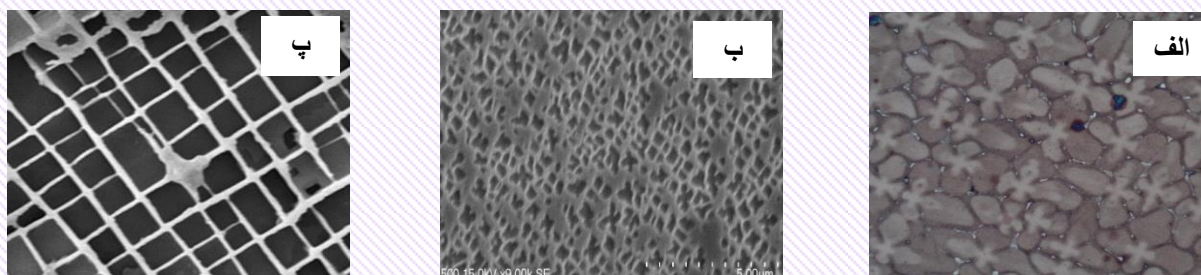
ریزساختار دو نمونه پلی کریستال و تک کریستال به وسیله میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی تهیه شده است. شکل ۳ تصاویر ریزساختار نمونه پلی کریستال که به وسیله میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی تهیه شده‌اند، را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۳- تصاویری از ریزساختار نمونه پلی کریستال. (الف) تصویر میکروسکوپ نوری، (ب) تصویر SEM از مرزدانه پرزاویه، (پ) تصویر SEM از رسوبات کاربید تانتالیم.

همان‌طور که از شکل ۳-الف قابل مشاهده است، اندازه دانه‌های نمونه پلی کریستال بسیار درشت بوده و به یک میلی‌متر نیز می‌رسد. مرزدانه پرزاویه در شکل ۳-ب به وضوح قابل مشاهده می‌باشد؛ همچنین رسوبات استحکام‌بخشی مانند کاربید تانتالیم که با بزرگنمایی بیشتر در شکل ۳-پ مشاهده می‌شوند، نیز حضور دارند.

در مقابل، شکل ۴، تصاویر ریزساختار نمونه تک کریستال با ساختاری عاری از مرزدانه و زمینه گامای یکدست را نشان می‌دهد. در شکل ۴-الف ساختار دندریتی به وضوح قابل مشاهده است. دیده می‌شود که قطعه به صورت یک بلور واحد منجمد شده و مرزدانه‌ای وجود ندارد. همچنین با دقت بیشتر، می‌توان تخلخل‌های کروی شکلی در برخی از محل‌های اتصال دندریت‌ها مشاهده نمود. شکل ۴-ب به وسیله الکترون‌های بازگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است و نشان‌دهنده رسوبات گاما پرایم در زمینه آستنیتی می‌باشد. بزرگنمایی بیشتر این رسوبات در شکل ۴-پ نشان می‌دهد این رسوبات آرایش بسیار منظمی دارند.



شکل ۴- تصاویر ریزساختار نمونه تک کریستال. (الف) تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عمود بر جهت انجماد، (ب) تصویر تهیه شده به وسیله الکترون بازگشتی SEM از فاز گاما پرایم در زمینه گاما، (پ) تصویر SEM با بزرگنمایی بیشتر از فاز گاما پرایم.

بخشی از استحکام دما بالای سوپرآلیاژ تک کریستال CMSX-۴ به همین رسوبات نسبت داده می‌شود. نقش رسوبات منظم در حفظ استحکام، از طریق سخت تر کردن عبور نابجایی است.

۳-۲-۲-آزمون کشش

برای ارزیابی خواص کششی، نمونه‌های آزمون کشش طبق استانداردهای ASTM E۲۱ و ASTM E۸/E۸M از دو نوع تک کریستال و پلی کریستال مطابق مدل ۴D ماشین‌کاری شدند و در دماهای محیط و ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت حرکت فک ۰/۲ mm/min تحت آزمون کشش قرار گرفتند. نتایج این آزمون در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲- نتایج آزمون کشش نمونه‌های پلی کریستال و تک کریستال سوپرآلیاژ CMSX-۴ در دمای محیط

گراید	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)
پلی کریستال	۱۰۱۵	۱۰۶۲	۱
تک کریستال	۹۴۰	۱۰۶۶	۶

جدول ۳- نتایج آزمون کشش نمونه‌های پلی کریستال و تک کریستال سوپرآلیاژ CMSX-۴ در دمای ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد

گريد	استحکام تسليم (MPa)	استحکام نهايي (MPa)	ازدياد طول (%)
پلی کریستال	-	۳۹۲	۳۳
تک کریستال	۱۱۳۰	۱۱۶۳	۲۲

داده‌های آزمون کشش برای دو نمونه پلی کریستال و تک کریستال طبق جدول ۲ نشان می‌دهد تنش تسلیم نمونه پلی کریستال در دمای محیط نسبت به نمونه تک کریستال بیشتر است؛ درحالی‌که استحکام نهایی دو نمونه بسیار به هم نزدیک اما ازدياد طول در تک کریستال بیشتر است. در مقابل، با مقایسه داده‌های جدول ۳ دیده می‌شود که استحکام نهایی در نمونه تک کریستال در دمای ۸۷۰ درجه بسیار بیشتر از نمونه پلی کریستال است. با مقایسه جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌گردد استحکام نهایی نمونه پلی کریستال از MPa ۱۰۶۲ در دمای محیط به MPa ۳۹۲ در دمای ۸۷۰ درجه رسیده و به میزان ۶۳٪ کاهش یافته است؛ این در حالی است که استحکام نهایی نمونه تک کریستال از MPa ۱۰۶۶ در دمای محیط، به MPa ۱۱۶۳ در ۸۷۰ درجه افزایش یافته است.

افزایش استحکام با افزایش دما در سوپرآلیاژهای تک کریستال یک رفتار غیرعادی نسبت به سایر فلزات و آلیاژهاست. این ویژگی غیرعادی موجب بهبود خواص خزشی می‌شود. هرچند دلایل متفاوتی برای این رفتار مطرح شده است اما بسیاری از محققان بر این عقیده هستند که علت اصلی آن رسوب مجدد فازهای سخت و کاهش فاصله رسوبات از یکدیگر و در نتیجه سخت‌تر شدن عبور نابجایی‌هاست. این رسوب‌گذاری مجدد در ساختارهای پلی کریستال نیز امکان وقوع دارد اما به علت غالب بودن پدیده‌های خزشی در مواد پلی کریستال مانند خزش مرزدانه‌ای (GBS) تأثیری بر بهبود استحکام ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

در کاربردهای استراتژیکی نظیر موتورهای جت‌ها و توربین‌های گازی فوق دما بالا که امکان استفاده از آلیاژهای مهندسی معمول و حتی سوپرآلیاژها، به علت شرایط خزشی شدید ممکن نیست، یکی از گزینه‌ها استفاده از سوپرآلیاژهای تک کریستال است. این گرید از سوپرآلیاژها به علت ویژگی‌های منحصر به فرد خود توانایی تحمل بارهای زیاد در دماهای بسیار بالا هستند.

نویسنده: محمد مزبانی پور

عملیات ثانویه در کوره‌های پاتیلی

مقدمه

در گذشته، روش ریخته‌گری کند کوره باز - کوره بلند متداول بود. با ابداع کنورتورهای اکسیژنی و ریخته‌گری پیوسته، روش کنونی، ریخته‌گری پیوسته - تصفیه ثانویه کنورتور کوره بلند است. در روزهای اولیه، ریخته‌گری کُنده - کوره قوس الکتریکی روشی رایج بود. در دهه ۱۹۶۰، تولید فولاد در خود کوره قوسی به صورت تصفیه ثانویه مانند استفاده از کوره پاتیلی، کربن‌زدایی با دمش اکسیژن تحت خلاء (VOD) و VADR متداول شد. به طور کلی، فولادهای خاص فقط از طریق روش کوره قوسی تولید می‌شد، زیرا در انتخاب انواع بارهای (شارژ) مختلف برای تولید انواع فولادها انعطاف‌پذیری بالایی وجود داشت و امکان تولید سفارشات با حجم پایین‌تر فراهم بود. استفاده از تصفیه ثانویه فرآیند فولادسازی را کاملاً متحول کرد. کوره‌های قوسی فقط تبدیل به پاتیل‌های ذوب شده و تصفیه و مراحل تولید نهایی فولاد در گاززدایی در خلاء (VD)، گاززدایی در خلاء با دمش آرگون (VAD) و کوره پاتیلی (LF) انجام می‌شد. پس از آنکه ریخته‌گری پیوسته متداول شد و کاملاً جا افتاد، از طریق آن انواع فولادهای خاص تولید شد. با بهبود مستمر تکنولوژی ریخته‌گری پیوسته، مقاومت اولیه مشتریان برای استفاده از مواد ریخته‌گری پیوسته از بین رفت (به نقل از مثال بولتن).

عملیات ثانویه در کوره پاتیلی

در این قسمت به طور مختصر فرآیند ذوب‌ریزی در کوره‌های قوس توضیح داده می‌شود و در شماره بعد عملیات ثانویه در کوره‌های پاتیلی آورده خواهد شد.

تجهیزات تصفیه بعد از ذوب فولاد در کنورتور اکسیژنی قلیایی (BOF) یا کوره قوس الکتریکی (EAF) قرار گرفته‌اند. ترکیب بار (شارژ) سنتی برای کوره قوسی شامل قراضه برگشتی سرد، قراضه بازار، گدازنده و غیره است که کل مواد توسط دو یا سه سطل پس از بلند کردن و چرخاندن سقف کوره به داخل آن شارژ می‌شود. قراضه توسط انرژی حاصله در بین دو الکترو و مواد شارژ هادی ذوب می‌شود. کوره شاید روشن و خاموش شده و شاید نیز زمانی که با یک ماده غیرمتالیکی مانند سرباره مواجه شود خاموش شود.

گام‌هایی در جهت تولید محصولات کیفی و مرغوب فولادهای آلیاژی برداشته شده است که از مرحله آماده‌سازی بار (شارژ) شروع می‌شود. بار (شارژ) مدرن برای کوره قوسی می‌تواند چدن مذاب، آهن اسفنجی، آهن بریکت گرم (HBI)، قراضه برگشتی، قراضه بازار و غیره باشد. به دلیل یکنواخت نبودن ترکیب قراضه، تهیه بار (شارژ) مناسب از نظر خواص شیمیایی فولاد پس از اتمام ذوب بسیار حائز اهمیت است. انواع قراضه

باید به صورت جداگانه نگهداری شده تا عناصر آلیاژی گران قیمت آن مانند نیکل، کروم، مولیبدن و ... بازیافت شود. قراضه بازار می تواند حاوی عناصر نامطلوب و غیرفلزی باشد.

مراحل لازم برای کوره قوسی را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- مرحله شارژ - هر چیزی بین یک تا سه سطل.

۲- مرحله ذوب.

۳- مرحله تصفیه.

۴- مرحله سرباره زدایی.

۵- مرحله تخلیه.

۶- مرحله آماده سازی کوره.

۱- شارژ کردن

ماده شارژ را می توان طبق گریدهای پیشنهادی برای ترکیب شیمیایی و خواص پس از اتمام ذوب تهیه کرد. علاوه بر این باید دقت کرد که بتوان قراضه سنگین و سبک را جایگزین کرد به طوری که حجم آن بیش از حجم ۲ یا ۳ سطل نباشد. اگر در مواردی شارژ به درستی تهیه نشود شاید سقف پس از چرخش به داخل بسته نشود. نوع سطل هایی که معمولاً استفاده می شوند، صدفی شکل هستند. عملیاتی که توضیح داده شده فقط برای شارژ منفصل است نه برای شارژ پیوسته. در اکثر کارخانه ها از شارژ (Skull) فرآیند شده استفاده می شود و اگر پوسته به اندازه های مطلوب فرآیند نشده و مواد غیر فلزی آن به حداقل نرسیده باشد می تواند موجب خرد شدن الکتروود و هزینه های سنگینی شود.

۲- ذوب

عملیات ذوب از طریق تزریق انرژی به مواد شارژی صورت می پذیرد. این انرژی می تواند به شکل انرژی الکتریکی یا انرژی شیمیایی باشد. کوره های مدرن توانسته اند در حد زیادی انرژی شیمیایی را جایگزین انرژی الکتریکی کنند که برای این منظور از طریق مشعل های سوخت اکسی و لوله های اکسیژن، اکسیژن خالص را تزریق می کنند که سیلیسیم، منگنز، کربن و آهن را اکسیده می کند و تمامی این واکنش ها اگزوترمیک هستند. کربن تزریق شده به داخل کوره با اکسیژن واکنش انجام داده و تولید CO می کنند. CO در خزینه یا حمام مذاب ایجاد حباب کرده و سرباره کف آلودی را تولید می کند. CO اضافی با اکسیژن واکنش کرده و تبدیل به CO₂ شده و مجدداً ایجاد گرما می کند. ابتدا پس از ایجاد حمام مذاب ولتاژ تخلیه را می توان بدون خطر

صدمه یا آسیب رسانیدن به سقف یا دیواره‌های جانبی افزایش داد. لوله‌های اکسیژن می‌تواند در مناطق سرد قراضه‌های درشت را برش داده و کوچک‌تر کند. زمانی که قراضه کافی ذوب شده باشد و فضای کافی ایجاد شده باشد، شارژ دوم را می‌توان استفاده کرده و فرآیند تکرار می‌شود. زمانی که شارژ آخر ذوب شده و تمام مراحل ذوب کامل شود درجه حرارت اندازه‌گیری شده و نمونه را آنالیز می‌کنند.

۳- تصفیه

عملیات تصفیه پس از ذوب شروع می‌شود. این عملیات را شاید نتوان در مورد عملیات ذوب با hot heel به کار برد که در آنجا ذوب و تصفیه ممکن است همزمان اجرا شوند. تصفیه یعنی کاهش عناصر نامطلوب در فولاد مانند گوگرد، فسفر، منگنز که در کنار آن باید میزان کربن را نیز کاهش داد تا به سطح دلخواهی برسد. بهتر است در مراحل اولیه تصفیه کاهش فسفر صورت پذیرد. حفظ فسفر سرباره بستگی خواهد داشت به درجه حرارت حمام مذاب، حالت بازی سرباره و سطوح FeO در سرباره. در درجه حرارت بالا و عیار پایین FeO فسفر به حالت قبلی برنمی‌گردد. عدم فعالیت یا خنثی بودن شدید نیز در حذف فسفر کمک خواهد کرد اما اگر سرباره دارای خاصیت خنثی یا غیر فعال شدیدی باشد غلظت سرباره بالا رفته و باید فلوراسپار را بدان اضافه کرد تا آن را به صورت رقیق‌تری درآورد. گوگرد به صورت سولفیدها در سرباره حذف می‌شود. زمانی که سطوح اکسیداسیون بالا باشد حذف گوگرد در کوره قوسی سخت است و این کار در طی مرحله احیا و تخلیه بهتر صورت می‌پذیرد. سیلیسیم، آلومینیوم و منگنز زودتر از کربن با اکسیژن واکنش نشان می‌دهد که اکسیدها را که وارد سرباره می‌شوند تشکیل دهد. واکنش کربن با اکسیژن، CO تولید کرده و انرژی آزاد می‌کند. از تزریق کربن و اکسیژن در کوره‌های مدرن ۳۰ تا ۳۵ درصد انرژی ورودی به دست می‌آید. بنابراین گاز CO در حمام مذاب تولید حباب کرده در نتیجه در سرباره ایجاد کف کرده و دارای چندین نتایج مفید است. به عنوان مثال کفی بودن سرباره می‌تواند سطح نیتروژن و هیدروژن را در فولاد کاهش دهد.

۴- سرباره‌زدایی

کوره به سمت در کج می‌شود تا سرباره برداشته شود. بهتر است که سرباره را هر چه زودتر برداریم تا مواد فسفوری آن به ذوب برنگردد. تزریق کربن به داخل سرباره منتهی به واکنش با FeO در سرباره می‌شود و تبدیل آن به آهن و CO می‌شود. در طی عملیات سرباره می‌تواند از دریچه سرباره به بیرون بریزد.

۵- تخلیه

پس از رسیدن به درجه مطلوب و آنالیز آن دریچه تخلیه باز شده و فلز به یک پاتیلی که کاملاً داغ است تخلیه شده تا فرآیند بیشتری در یکی از LF/FAD/VD صورت پذیرد. اکسیدزداها (deoxidants) به شکل

آلومینیوم یا فروسیلیسیم طی تخلیه در پاتیل اضافه می‌شود. اضافه کردن فروآلیاژها نیز در صورت نیاز صورت می‌پذیرد. عناصر تشکیل دهنده سرباره در پاتیل اضافه می‌شود تا سرباره جدید برای عملیات LF تولید شود. عملیات شیمیایی در کوره پاتیلی را می‌توان در مقایسه با گذشته که فولاد در خود کوره قوسی نهایی می‌شد در دامنه یا محدوده کوچکتري به دست آورد.

۶- آماده‌سازی کوره

پس از آنکه کوره تخلیه شد باید داخل آن از نظر عیب و ایراد آستر نسوز و نشت آب کنترل شود. نقاطی که دارای عیب باشند توسط ماشین گانینگ با مواد نسوز مخصوص تعمیر می‌شوند. در شرایط و سیستم کنونی آماده‌سازی کوره نباید بیش از ۵ تا ۷ دقیقه باشد. کوره آماده برای شارژ بعدی است.

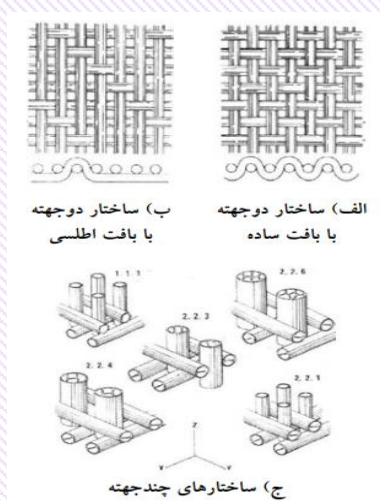
نویسنده: حامد خضری

خواص و کاربردهای کامپوزیت‌های کربن - کربن

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های کربن - کربن به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مواد مهندسی در دنیای امروز شناخته می‌شوند. این مواد که از ترکیب الیاف کربن و زمینه‌ای از جنس کربن تشکیل شده‌اند، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله خصوصیات بارز این کامپوزیت‌ها می‌توان به وزن کم، استحکام بالا و مقاومت در برابر دماهای بسیار بالا اشاره کرد. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که کامپوزیت‌های کربن - کربن در صنایع هوافضا، دفاعی و انرژی هسته‌ای کاربردهای فراوانی پیدا کنند.

در سال‌های اخیر، توجه به این مواد به دلیل نیاز روزافزون به مواد سبک و مقاوم در برابر حرارت و فشار افزایش یافته است. کامپوزیت‌های کربن - کربن دارای چگالی پایین‌تری نسبت به فلزات و سرامیک‌ها هستند و این امر آن‌ها را برای کاربردهایی که نیاز به کاهش وزن دارند، ایده‌آل می‌سازد. علاوه بر این، مقاومت حرارتی بالای این کامپوزیت‌ها، آن‌ها را برای استفاده در شرایط شدید دما مناسب می‌کند. با توجه به اینکه کامپوزیت‌های کربن - کربن می‌توانند در دماهای بالای ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد عملکرد خوبی داشته باشند، این ویژگی آن‌ها را برای استفاده در صنایع هوافضا و تجهیزات حرارتی بسیار جذاب کرده است. همچنین، مقاومت شیمیایی بالای این مواد باعث شده که در محیط‌های خورنده نیز بتوانند دوام بیاورند. شماتیک ریزساختار و نحوه قرارگیری الیاف کربن در شکل ۱ آمده است.

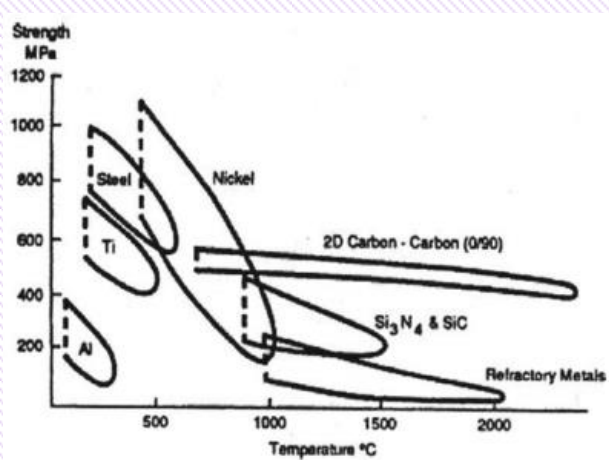


با وجود مزایای بسیار، چالش‌هایی نیز در استفاده از کامپوزیت‌های کربن - کربن وجود دارد. اکسیداسیون در دماهای بالا یکی از مشکلات اصلی است که نیاز به توسعه روش‌های جدید برای افزایش پایداری این مواد دارد.

همچنین، هزینه تولید بالای این کامپوزیت‌ها می‌تواند مانع از گسترش کاربردهای آن‌ها شود. در مجموع، کامپوزیت‌های کربن - کربن با ویژگی‌های منحصر به فرد خود، پتانسیل بالایی برای استفاده در صنایع مختلف دارند و تحقیقات بیشتری برای بررسی خواص و کاربردهای آن‌ها ضروری است. این مقاله به بررسی خواص مکانیکی و حرارتی این نوع کامپوزیت‌ها و کاربردهای آن‌ها در صنایع مختلف خواهد پرداخت.

۲- خواص مکانیکی کامپوزیت‌های کربن - کربن

کامپوزیت‌های کربن - کربن موادی با دانسیته پایین‌اند که در دماهای بالاتر از ۳۰۰۰ درجه سانتیگراد سختی و استحکام بالایی دارند. و به‌دلیل همین مزیت منحصر به‌فرد است که در صنایع هوافضا کاربردهای بسیاری دارند. البته باید توجه داشت که خواص مکانیکی کامپوزیت‌های کربن - کربن هنوز به اندازه کافی مشخص نیست؛ اما باید توجه داشت که خواص مکانیکی این دسته از کامپوزیت‌ها به عواملی چون طرح قرارگیری الیاف، نوع الیاف کربن، زمینه و نهایتاً فرایند تولید بستگی دارد. سختی و استحکام بالای الیاف تقویت‌کننده و ترکیب‌شده با زمینه کربنی با دانسیته پایین خواص مطلوبی را در کامپوزیت‌های کربن - کربن ایجاد کرده است. این کامپوزیت‌ها استحکام و سختی مخصوص قابل مقایسه‌ای با مواد مهندسی پرکاربردی مثل فولاد، تیتانیوم و آلیاژهای تیتانیوم دارند. شکل ۲ کارایی کامپوزیت‌های

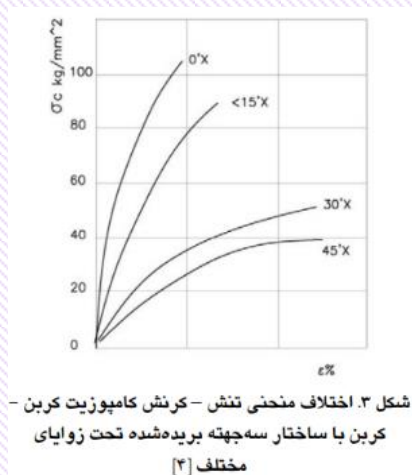


شکل ۲. مقایسه استحکام مواد گوناگون در برابر دما [۸]

کربن - کربن را نسبت به دیگر مواد مهندسی نشان می‌دهد.

شکل ۳ انواع نمودارهای تنش - کرنش را برای ترکیب یک کامپوزیت کربن - کربن با ساختار سه جهته اورتوگونال، برای نمونه‌های مختلف بریده‌شده با رعایت محور X نشان می‌دهد. نمونه‌های بریده‌شده موازی با تقویت‌کننده محور، X شکست ترد را نشان می‌دهد. کرنش نهایی در این

جهت تقریباً با کرنش نهایی کامپوزیت‌های یک‌جهته منطبق است. برای نمونه‌هایی که با یک زاویه‌های با محور الیاف بریده می‌شوند، خصوصیات نمودارها تغییر می‌کند. تغییر از زاویه ۱۵ به ۳۰ درجه سبب تغییر رفتار مکانیکی ماده می‌شود داده‌ها نشان می‌دهند که سازوکار احتمالی شکست یک کامپوزیت کربن - کربن سه‌بعدی تحت فشار پیچشی اتفاق می‌افتد. در دوره اولیه، زمانی که بار فشاری نسبتاً کم است، باندهای فیبر و زمینه بدون اینکه شکسته شوند، تغییر الاستیک پیدا می‌کنند. بخش خطی منحنی تنش - کرنش با این مرحله منطبق است. وقتی که بار افزایش می‌یابد، زمینه، مخصوصاً قسمتی که شامل تعداد زیادی تخلخل و ترک است، با خسارت تغییر شکل می‌دهد. باندهای فیبر نزدیک منطقه، تغییر فرم می‌یابند و کج می‌شوند؛ لذا رفتار مواد از الاستیک خطی به الاستوپلاستیک تغییر می‌کند. وقتی تنش‌ها بیشتر افزایش می‌یابد، زمینه له و خرد می‌شود، باندهای طولی، خمیدگی بیشتری پیدا می‌کنند. در صورتی که بعضی از تغییرها به صورت کج شدن و لغزش است و به طرف دیگران نزدیک تر می‌شود. با افزایش تغییر فرم، مرحله نیمه پلاستیک ۲ رخ می‌دهد و زمانی که به ماکزیمم بارگذاری



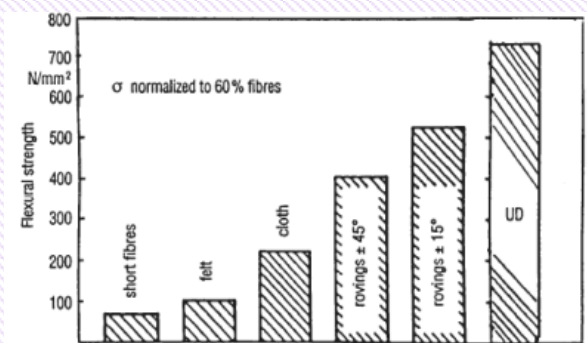
رسید، شکست رخ می‌دهد.

برای کامپوزیت‌های کربن - کربن، پنج باند لغزش مستقل که برای تغییر فرم پلاستیک مواد چند کریستالی نیاز است، وجود ندارد؛ بنابراین الیاف تقویت‌کننده چندجهته و چند فصل مشترک در ساختن کامپوزیت‌های کربن - کربن، لغزش را برای تغییر فرم سخت می‌کنند. تغییر فرم اساساً توسط تغییر در تخلخل و بیرون کشیده شدن فیبرها اتفاق می‌افتد. تخلخل‌های درون کامپوزیت‌های کربن - کربن، به راحتی تحت تنش کششی بزرگ شده و ترک جدید برای آزاد شدن تنش درونی، در طول باند لغزش کامپوزیت کربن - کربن تولید می‌شود. نسبت به فیبر و زمینه، فصل مشترک دارای پایین‌ترین استحکام است؛ بنابراین فصل مشترک، تحت تنش تست شکسته و تغییر فرم ماکرو دیده می‌شود. همچنان که الیاف به صورت متوالی از زمینه بیرون کشیده می‌شوند. تشکیل و گسترش یک ترک در گرافیت، باعث شکست اولیه می‌شود، اما کامپوزیت کربن - کربن به صورت غیریکنواخت و ساختار مرکب مشاهده می‌شود.

استحکام فیبر، بسیار بالاتر از زمینه و فصل مشترک است. زمانی که ترک به فصل مشترک فیبر و زمینه برخورد می‌کند، معمولاً در فصل مشترک حرکت می‌کند. فرایند کشش، از تشکیل ترک تا شکست اولیه نمونه، با یک سری از فرایندهای گوناگون، شامل تغییر جهت ترک، گسترش ترک در طول فصل مشترک، جداکردن فیبرها از زمینه و در آخر، بیرون کشیدن فیبرها همراه است (شکل ۴). بنابراین گرافیت‌های مختلف به‌صورت ناگهانی می‌شکنند و همچنان که بارگذاری افزایش می‌یابد، یک سری ترک ایجاد می‌شوند. عموم کامپوزیت‌های کربن - کربن، چقرمگی عالی دارند. به‌طوری‌که حتی اگر یک میخ به داخل آن‌ها فرو رود، ثابت می‌مانند. از جمله خواص کامپوزیت‌های کربن - کربن مقاومت شیمیایی بالاست. خواص مخصوص ترکیب مانند مقاومت شیمیایی و تخلخل این کامپوزیت‌ها سبب می‌شود که برای اندام‌های مصنوعی و اصلاح و ترمیم عیوب استخوانی بکار روند. اما مشکل خاص و ویژه کامپوزیت‌های کربن - کربن این است که در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد اکسید می‌شوند. یک پیشنهاد برای کاهش این مشکل، ایجاد یک اتمسفر راکد، در محیطی که کامپوزیت در آن تولید می‌شود، و یا حفاظت سطح مواد با لایه‌ای سرامیکی پوشیده شده از کاربید سیلیکون یا معادل آن می‌باشد. خواص مورد توجه کامپوزیت‌های کربن - کربن، استحکام و سختی، چقرمگی شکست، خواص سایشی و هدایت حرارتی است. سازوکارهای عامل برای این خواص، مخصوصاً در مواد کامپوزیت چند فازی، متفاوت است. خواص مکانیکی سازنده‌ها و کسر حجمی آن‌ها و چسب و سازوکار توسعه ترک‌ها، کنترل‌کننده خواص مکانیکی کامپوزیت است. بعلاوه سازنده‌ها، هم تقویت‌کننده‌ها و هم زمینه، در طول فرایند تولید، مانند نفوذ به‌وسیله عملیات حرارتی، تغییر ابعادی، تنش‌های حرارتی و... دستخوش تغییر می‌شوند. تمام این فاکتورها بر خواص نهایی کامپوزیت اثر می‌گذارد. دسته‌ای از خواص جالب کامپوزیت‌های کربن - کربن عبارت‌اند از:

۲-۱- خصوصیات مکانیکی

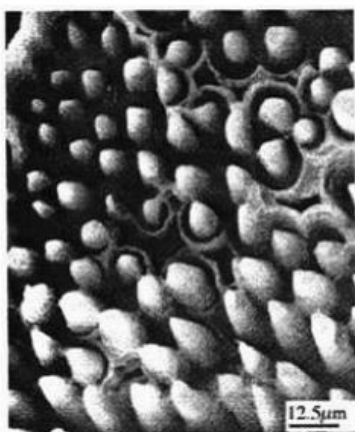
دسته زیادی از خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها به فیبرهای سازنده و جهت آن‌ها بستگی دارد (شکل ۴). این کامپوزیت‌ها یک رنج چقرمگی شکست بالا و مقاومت خستگی و خزش خوبی را نشان می‌دهند. در آزمایشهای دما بالا، کامپوزیت‌های کربن - کربن، ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش در خواص مکانیکی در دمای ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر ساکن از خود نشان می‌دهند. هرچند این خواص در هوا بین ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد، که البته به دما و زمان بستگی دارد.



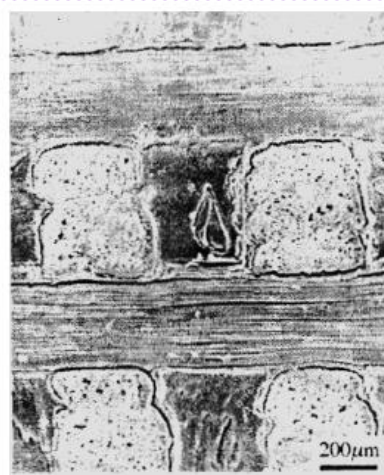
شکل ۴. تأثیر نوع و جهت الیاف
بر استحکام کامپوزیت [۱۰]

۲-۲- خواص حرارتی

امروزه کاربرد مواد پایه کربن، در ساخت و تولید مواردی چون درپوش یاتاقان‌ها، برس‌های الکتریکی، انواع لنت ترمز (برای مواردی چون وسایل نقلیه نظامی، هواپیماهای مسافری، کامیون‌ها و ریل راه‌آهن) گسترش یافته است. این خود به سبب خواص اصطکاکی - سایشی پایه کربن، به اضافه استحکام بالا و هدایت حرارتی الیاف تقویت‌کننده بوده است. شکل‌های ۵ و ۶ میکروگراف‌های SEM از سطوح ساییده‌شده را نمایش می‌دهند. در این میکروگراف‌ها می‌توان دید که الیاف کربن و زمینه کربن به صورت غیریکنواخت ساییده شده‌اند. الیاف کربنی که تا سطح ادامه دارند در ابتدا ساییده می‌شوند و همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، انتهای الیاف به صورت مخروطی است. شکاف‌های بین زمینه کربن و فیبرهای کربنی در طول ساییش امتداد پیدا می‌کنند.



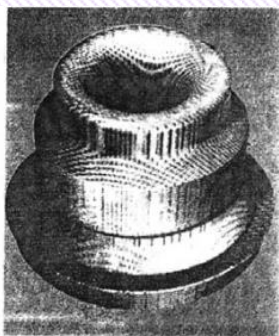
شکل ۶. الیاف در جهت Z در سطح ساییده‌شده [۱۱]



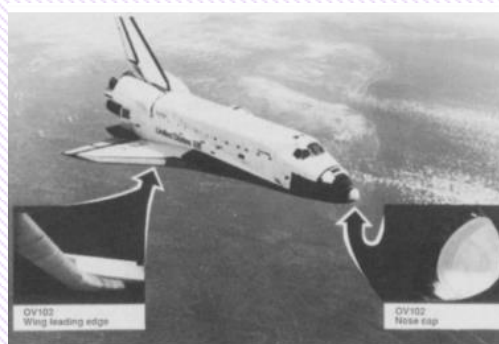
شکل ۵. میکروگراف SEM
کامپوزیت با زمینه کربن [۱۱]

۳- کاربرد کامپوزیت‌های کربن - کربن

کامپوزیت‌های کربن - کربن، همانند دیگر مواد مهندسی، پتانسیل بالایی دارند. با این حال قیمت بالای آن‌ها سبب محدود شدن کاربرد آن‌ها در زمینه هوافضا و دیگر موارد خاص شده است. نبود اطلاعات طراحی و روش طراحی مناسب نیز سبب محدودیت کاربرد انواع کامپوزیت‌های کربن - کربن شده است. محدودیت دیگر در خصوص کامپوزیت‌های کربن - کربن مربوط به قابلیت اکسیداسیون آن‌ها در دماهای بالاست. این مشکل شامل کاربردهای کوتاه‌مدت از قبیل حفاظت‌های حرارتی و نازل‌های راکت نمی‌شود. با این حال، در کاربردهای بلندمدت، به محیط‌های خنثی یا کم حرارت، جهت جلوگیری از اکسیداسیون نیاز است. کاربرد کامپوزیت‌های کربن - کربن در ساخت سپرهای حرارتی با موفقیت انجام شده است. بیش از ۱۵ سال است که کامپوزیت‌های کربن - کربن با ساختار سه‌جهته برای تولید دماغه مخروط‌ها و محافظ حرارتی راکت‌ها استفاده می‌شوند. به این علت، نیاز اصلی در گسترش آن‌ها، شامل بعضی خواص، مانند مقاومت در برابر حرارت و شوک‌های مکانیکی و سایش شدید است. در سال‌های گذشته، ساختارهای کربن - کربن خودشان را برای راکت‌ها و تولیدات مهندسی فضایی، همچنین قسمت‌های دماغه و موتور



شکل ۸. نازل ساخته شده از کامپوزیت کربن - کربن چندجهته [۴]

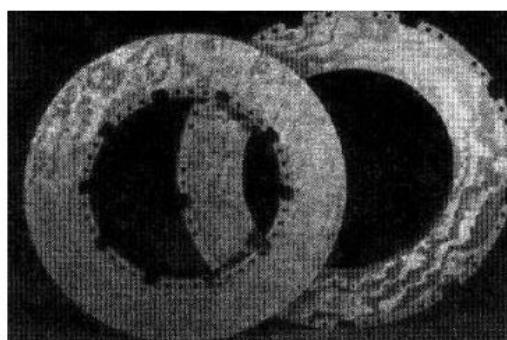


شکل ۷. قطعات ساخته شده از کامپوزیت کربن - کربن سه‌جهته و چهارجهته [۴]

راکت‌ها و بست قسمت‌های وابسته به مخزن‌های بزرگ و دودکش راکت‌های شناور، نشان داده‌اند. بعضی از تولیدات کربن - کربن در شکل ۷ نشان داده شده است. نازل‌ها بخش مهمی از موتور راکت‌ها هستند که طی ۱۵ سال گذشته تغییرات قابل توجهی در ابعاد، طراحی، شکل و مواد کرده‌اند (شکل ۸). گازهای گرم در سراسر نازل حرکت می‌کنند و از آن خارج می‌شوند. موادی که در این کار استفاده می‌شوند، عمر کوتاهی دارند، چون بار دینامیکی و استاتیکی با گرمای شدید ترکیب می‌شوند. نازل‌های خارجی به طور نمونه، پوشش داده می‌شوند تا اکسید شدن و صدمه دیده ترکیب به تأخیر بیفتد. اگر ترکیب خراب شود، مسیر نباید طولانی باشد، تا بتوان کاملاً کنترل شوند.

بنابراین، کامپوزیت‌های کربن - کربن دهانه خارجی نازل‌ها، باید دارای پایداری و استحکام عالی در برابر شرایط سخت، برای زمان‌های طولانی داشته باشند. هرچند، زمان مؤثر، معمولاً بیشتر از یک دقیقه نیست. اخیراً انگیزه‌هایی برای ساخت موتور هواپیماها از کامپوزیت‌های کربن - کربن تسریع یافته

است. بسیاری از کشورها، راهکار استفاده از این مواد برای ساخت هواپیماهای فراصوت با قابلیت پرواز با سرعت بالاتر از ۵ ماخ را کشف کرده‌اند. مزیت سیستم‌های کربن - کربن، طراحی ساده‌تر آن و کاهش وزن و حجم نازل می‌باشد. کاربردهای تجاری این فناوری، در زمینه سیستم‌های ترمز هواپیماها و ترمز ماشین‌های رالی و ... در دمای بالا، کاربرد در استحکام‌های زیاد می‌باشد. کامپوزیت‌های کربن - کربن نشان داده‌اند که توانایی حفظ استحکام و مقاومت سایشی را دارند. ترمزهای کامپوزیتی کربن - کربن، دماهای مؤثر و بالا و ترمزهای شدید را تحمل می‌کنند. اگر قیمت کامپوزیت‌های کربن - کربن برای ترمز هواپیما بالاست، استحکام بالا، گرمای ویژه بالا و وزن پایین آن‌ها روی کاربردهای مؤثر است. این موارد در سایر شاخه‌های هوافضا نیز کاربرد دارند. دلیل آن نیز دارابودن مقاومت ضربه‌ای، حرارتی خوب و درجه حرارت بالای تصعیدشان است. ساختار چندسویه این دسته از کامپوزیت‌ها، در اغلب موارد، دارای مزیت‌های فراوانی است. کامپوزیت‌های کربن - کربن برای ساخت سپرهای گرمایی رادیواکتیو، وسائل فضایی از قبیل سفینه‌های فضایی، به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی کاربردهای تجاری این نوع مواد در حال توسعه می‌باشد. این دسته از کامپوزیت‌ها برای استحکام



شکل ۹. دیسک‌های ترمز هواپیمای غیرنظامی
از جنس کامپوزیت کربن - کربن [۶]

بخشیدن به بخش‌های داخلی استخوان‌های شکسته مورد استفاده قرار داده‌اند. کربن‌ها، تطابق‌پذیر بوده و در نتیجه این مواد نیز از لحاظ ساختاری با استخوان مطابقت دارند. مدول ینگ، بایستی معادل با استخوان باشد و دارای مقاومت بالا باشد. وزن مخصوص کامپوزیت‌های کربن - کربن، به اندازه وزن مخصوص استخوان است. هم‌اکنون قالب‌های پرس‌کاری داغ کربن - کربن، در زمره تولیدات تجاری محسوب می‌شوند. این قالب‌ها، در برابر فشارهای بالا مقاوم بوده و نسبت به گرافیت پلی کریستال ظاهری، بادوام‌ترند. همچنین سیستم‌های ترمز دیسکی (شکل ۹). ساخته شده از این مواد، پیشرفت وسیعی داشته است. کاربرد فعلی این کامپوزیت‌ها در هواپیماهای نظامی و پهن بال‌ها می‌باشد. با این حال امید است که با گسترش فناوری این گروه مواد در آینده در هواپیماهای معمولی و تجاری نیز کاربرد داشته باشند.

کاربردهای دیگر این مواد در سیستم کانال‌های گرمایی، تجهیزات راکتور هسته‌ای، اتصالات الکتریکی، آب‌بندهای گرم و یاتاقان‌ها می‌باشد. با اصلاح روش‌های تولید و کاربرد وسیع‌تر آن‌ها با قابلیت حجم‌های بالاتر، کامپوزیت‌های کربن - کربن چندسویه، جهت کاربردهای فوق به‌صرفه‌تر و قابل قبول‌تراند. در ضمن دسترسی به الیاف کربنی ارزان بر روی تولیدات بعدی این مواد مؤثر خواهد بود.

نویسنده: محمد مزبانی پور

نانو مواد

مقدمه

فناوری نانو، با بررسی فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی در ابعاد اتمی و نانومتری، امکان کنترل و هدایت این فرآیندها را با دقت بالاتری فراهم می‌کند. این فناوری، با شناخت و کنترل پدیده‌ها در ابعاد اتمی و آنگسترومی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علمی و صنعتی یافته است.

نانومواد به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱- نانوذرات: ذراتی با ابعاد نانومتری.

۲- مواد نانوساختار (یا مواد نانوکریستال): موادی که در یک یا چند بعد، ساختار نانومتری دارند. این مواد خود به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

الف) نانوسیم‌ها: ساختارهای یک‌بعدی نانومتری.

ب) نانولوله‌ها: ساختارهای استوانه‌ای نانومتری.

پ) نانولایه‌ها: لایه‌های نازک با ضخامت نانومتری.

تغییر در فاصله بین اتم‌ها و نسبت سطح به حجم بالا در نانوذرات، خواص ماده را به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عنوان مثال، ترکیبات کاربردی و نیتريدی پراکنده شده در یک ماتریس آمورف، سختی‌هایی قابل مقایسه یا حتی بالاتر از الماس از خود نشان می‌دهند. این تغییر در فاصله بین اتم‌ها، انرژی آزاد سطح و پتانسیل شیمیایی را نیز تغییر می‌دهد که بر خواص ترمودینامیکی ماده (مانند نقطه ذوب) تاثیر می‌گذارد. کاهش اندازه ذرات، نقطه ذوب را کاهش می‌دهد و این کاهش در ابعاد بسیار کوچک، بسیار شدیدتر است.

روش‌های تولید نانومواد

به طور کلی، دو روش اصلی برای ساخت نانومواد وجود دارد:

۱- روش بالا به پایین: در این روش، با استفاده از ابزارهای مختلف، ماده از یک جسم حجیم جدا شده و به ابعاد نانومتری می‌رسد.

۲- روش پایین به بالا: در این روش، نانومواد با استفاده از به هم پیوستن بلوک‌های سازنده مانند اتم‌ها و مولکول‌ها و قرار دادن آن‌ها در کنار یکدیگر یا استفاده از خودآرایی، تولید می‌شوند. خودآرایی به معنای طراحی مولکول‌ها و ابرمولکول‌هایی است که اساس تشکیل آن‌ها مکمل بودن شکل ساختاری است. اتم‌ها و

مولکول‌ها همواره در جایی قرار می‌گیرند که کمترین انرژی آزاد را داشته باشند و به سمت انرژی آزاد منفی تمایل دارند. انرژی آزاد در یک سیستم، توسط استحکام پیوند و انتروپی تعیین می‌شود.

روش‌های تولید انبوه نانومواد

روش‌های مختلفی برای تولید انبوه نانومواد وجود دارد که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

۱- روش مکانیکی: این روش، نمونه‌ای از روش‌های بالا به پایین است و بر اساس متلاشی شدن ساختار دانه‌های درشت استوار است. تکنیک آلیاژسازی مکانیکی، روشی است که در آن با استفاده از یک آسیاب ساچمه‌ای پرانرژی، مخلوط پودرهای مختلف در سطح اتمی با یکدیگر آسیاب و ترکیب می‌شوند. از این تکنیک، علاوه بر پودرهای عنصری خالص، از پودرهای آلیاژی و سرامیک‌ها نیز برای ایجاد آلیاژها و کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. مکانیزم اصلی در این روش، سایش مکانیکی همراه با خرد شدن است. شکست دانه‌ها به علت انرژی منتقل شده به آن‌ها رخ می‌دهد که این انرژی به سرعت دورانی (یا ارتعاشی) محفظه، اندازه و تعداد توپ‌ها، نسبت جرم توپ به ذرات و مدت سایش بستگی دارد.

معایب روش مکانیکی:

الف) آلودگی و ناخالصی ناشی از ماده ساینده

ب) ایجاد ساختار خشن در پودرهای تولیدی

پ) عدم یکنواختی در اندازه دانه‌ها

ت) ترکیب شیمیایی غیر یکنواخت

۲- سل-ژل: سل-ژل، فرآیند خودآرایی، خودبه‌هم‌پیوستگی یا خودانباشتگی است که در طی آن نانومواد تشکیل می‌شوند. سوسپانسیونی که شکل خود را حفظ می‌کند، ژل نامیده می‌شود. فرآیند سل-ژل، مستلزم تکمیل تدریجی شبکه‌ها از طریق تشکیل یک سوسپانسیون کلئیدی (سل) و ژله‌ای شدن سل برای تشکیل شبکه‌ای در یک فاز مایع پیوسته (ژل) است. پیش‌ماده‌های لازم برای سنتز این کلئیدها عموماً شامل یون‌هایی از یک فلز است که توسط گونه‌های فعالی به نام لیگاندها احاطه شده‌اند. آلکوکسیدها و آلکوکسیلان‌ها بیشتر متداول می‌باشند، زیرا به سرعت با آب وارد واکنش می‌شوند.

تشکیل سل-ژل در چهار مرحله به وقوع می‌پیوندد:

الف) هیدرولیز

ب) تراکم و پلیمری شدن منومرها برای تشکیل ذرات

پ) رشد ذرات

ت) به هم چسبیدن ذرات و توده‌ای شدن آن‌ها از طریق تشکیل شبکه‌هایی که در سراسر محیط مایع گسترش یافته‌اند و سبب زخیم شدن آن‌ها می‌گردد که تشکیل یک ژل می‌دهد.

۳- واکنش حالت‌های جامد-مایع: این روش، از برگرفتن رسوب دانه‌ها از فاز محلول استفاده می‌کند و فرآیند آن بر پایه وجود هسته مورد نظر استوار است. به عنوان مثال، پودر دی‌اکسید تیتانیوم با اندازه‌های بین ۷۰ تا ۳۰۰ نانومتر با استفاده از این روش، از تیتانیوم تترا ایزوپروپوکساید تولید می‌شود.

۵- چگالش فاز گازی: این روش، به طور کلی بر مبنای پیرولیز ماده اصلی تولید نانوذرات استوار است. در این روش، یک گاز حامل بی‌اثر و خالص وارد محفظه حاوی مایع اصلی تولید نانوذرات می‌شود. مایع در این محفظه توسط یک مشعل تجزیه شده و به وسیله گاز حامل به مبرد فرستاده می‌شود. بخارات در مبرد سرد شده و به صورت دانه یا خوشه در می‌آیند. اندازه دانه‌های تولید شده در این روش به عواملی مانند نوع گاز بی‌اثر، فشار گاز بی‌اثر، زمان باقی ماندن ذرات در محدوده رشد و نسبت نرخ تبخیر به فشار بخار ماده تبخیر شده بستگی دارد.

کاربردهای نانوذرات

نسبت سطح به حجم بالای نانوذرات، امکان تولید کاتالیزورهای قدرتمندی در ابعاد نانومتری را فراهم می‌کند. این نانوکاتالیزورها، راندمان واکنش‌های شیمیایی را به شدت افزایش داده و از تولید مواد زائد در واکنش‌ها جلوگیری می‌کنند. به کارگیری نانوذرات در تولید مواد دیگر، می‌تواند استحکام آن‌ها را افزایش دهد یا وزن آن‌ها را کم کند، مقاومت شیمیایی و حرارتی آن‌ها را بالا ببرد و واکنش آن‌ها را در برابر نور و تشعشعات دیگر تغییر دهد. با استفاده از نانوذرات، نسبت استحکام به وزن مواد کامپوزیتی به شدت افزایش خواهد یافت.

در ساخت شیشه ضد آفتاب از نانوذرات اکسید روی استفاده می‌شود که علاوه بر افزایش کارایی، عمر این نوع شیشه‌ها را نیز چند برابر می‌کند. همچنین، از نانوذرات در ساخت انواع ساینده‌ها، رنگ‌ها و لایه‌های محافظتی جدید و بسیار مقاوم برای شیشه‌ها و عینک‌ها، کاشی‌ها، حفاظ‌های الکترومغناطیسی شیشه‌های اتومبیل و پنجره استفاده می‌شود. پوشش‌های ضد نوشته برای دیوارها و پوشش‌های سرامیکی برای افزایش استحکام سلول‌های خورشیدی نیز با استفاده از نانوذرات تولید شده‌اند.

وقتی اندازه ذرات به نانومتر می‌رسد، تاثیرپذیری از نور و امواج الکترومغناطیسی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. با توجه به این موضوع، اخیراً چسب‌هایی از نانوذرات تولید شده‌اند که کاربردهای مهمی در صنایع الکترونیکی

دارند. نانولوله‌ها در موارد الکتریکی، مکانیکی و اپتیکی بسیار مورد توجه هستند. به عنوان مثال، نانولوله‌های طلا در الکترونیک و بیوشیمی کاربرد دارند و تولید آن‌ها بر پایه محلول و فاز بخار است.

نانولایه‌ها در پوشش‌های حفاظتی با افزایش مقاومت در خوردگی و افزایش سختی در سطوح و فوتولیز و کاهش شیمیایی کاربرد دارند. نانوذرات نیز به عنوان پیش‌ماده یا اصلاح‌ساز در پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

Thompson و Haruta اثبات کردند که نانوذرات فعالیت کاتالیستی وسیعی دارند، مانند تبدیل منو اکسید کربن به دی اکسید کربن، هیدروژنه کردن استیرن به اتیل بنزن و هیدروژنه کردن ترکیبات اولفینی در فشار بالا و فعالیت کاتالیستی نانوذرات مورد استفاده در سنسورها که مانند آنتن الکترونی بین الکتروود و الکتروولیت ارتباط برقرار می‌کنند.

فناوری نانو و استفاده از نانومواد، با توجه به خواص منحصر به فرد و کاربردهای گسترده‌ای که دارند، نقش مهمی در توسعه صنایع مختلف ایفا می‌کنند. با پیشرفت روزافزون این فناوری، انتظار می‌رود که شاهد کاربردهای جدید و نوآورانه‌تری از نانومواد در آینده باشیم.

نویسنده: نسترن نقشه‌کشی

آشنایی با برقگیر و عملکرد آن

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، با تقدم روزافزون فناوری و پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه‌های برق و الکترونیک، نیاز به تکنولوژی‌های حفاظتی در برابر نوسانات ولتاژ بیش از پیش اهمیت یافته است. در این زمینه، قرص‌های برقگیر اکسید روی به عنوان اجزای حیاتی در سیستم‌های حفاظتی از افزایش ولتاژها و نوسانات ناگهانی برق ایفا کننده نقش اساسی می‌باشند [۱].

اهمیت قرص‌های برقگیر از این رو است که توانمندی بسیار بالایی در مهار افزایش ناگهانی ولتاژها، جلوگیری از آسیب به تجهیزات الکتریکی، و حفاظت از سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی ارائه می‌دهند. استفاده از قرص‌های برقگیر دارای مزایای چشم‌گیری است؛ این قرص‌ها قادر به تخلیه انرژی الکتریکی در هنگام حمله ولتاژهای ناگهانی هستند و از تجهیزات الکتریکی در مقابل این نوسانات حفاظت می‌کنند [۲-۳].

عدم استفاده از قرص‌های برقگیر می‌تواند به شدت خطرناک باشد. در مواجهه با اضافه ولتاژ گذرا، تجهیزات الکتریکی در معرض خطرات جدی قرار می‌گیرند که ممکن است به آسیب دیدن و یا حتی خرابی دائمی منجر شود. این خطرات نه تنها هزینه‌های بازسازی و تعمیر را افزایش می‌دهند بلکه می‌توانند برای ایمنی انسان‌ها تهدید به شمار آید [۴].

خاصیت حفاظتی برقگیرهای اکسید روی ناشی از رابطه غیرخطی شدید بین ولتاژ و شدت جریان آن در محدوده وسیعی از شدت جریان است؛ این رابطه به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$I = U \cdot K^{\alpha} \quad (1)$$

که در آن I جریان DC، K یک ثابت و α توان غیرخطی است [۵]. برای درک بهتر غیرخطی بودن مقاومت الکتریکی برقگیرها می‌توان اشاره کرد که برقگیر در شرایط ولتاژ عادی، دارای مقاومت الکتریکی در حدود 10^9 اهم دارد؛ اما در شرایط اضافه ولتاژ گذرا، مقاومت می‌تواند به صفر میل کند. ورودی برقگیر به صورت موازی در ابتدای تجهیزات گران‌قیمت و خروجی آن به سیستم زمین (earth) متصل می‌شود. مقاومت الکتریکی برقگیر در هنگام حملات ولتاژ بالا (به دلیل خطاهای سیستمی و یا عوامل بیرونی مانند صاعقه)، در بازه زمانی کمتر از یک میکروثانیه تا نزدیک به صفر اهم کاهش پیدا می‌کند و با هدایت جریان به زمین، مانع آسیب دیدن سایر تجهیزات می‌شود. [۲].

برقگیر اکسید روی اصولاً ترکیبی از اکسیدهای سرامیکی است که بخش عمده آن را اکسید روی تشکیل می‌دهد. اکسید روی یک نیمه‌هادی با گاف انرژی حدود 3.3 eV است [۵].

قرص‌های برقگیر اکسید روی از طریق روش‌های مهندسی پودر تولید می‌شوند. کیفیت و ظرفیت آنها تابعی از مواد و روش تولید هستند که در بخش بعدی با تفصیل بیشتری بحث خواهد شد.

۲- مکانیزم حفاظتی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، عملکرد حفاظتی برقگیر اساساً به دلیل غیرخطی بودن مقاومت الکتریکی آنست. هرچه خاصیت غیرخطی بودن مقاومت الکتریکی آن شدیدتر باشد، عملکرد آن نیز بهتر خواهد بود. طبق رابطه (۱)، توان غیرخطی (α) بیشتر به معنای مقاومت غیرخطی شدیدتر است [۵-۶].

مقاومت غیرخطی برقگیر به ریزساختار تفجوشی شده آن نسبت داده می‌شود. در ساختار یک پودر تفجوشی شده، دانه‌های پودر طی فرایند تفجوشی در حضور مواد کمک زینتر، از طریق سطح، در یکدیگر نفوذ کرده و فضای خالی میان آنها توسط مرزدانه‌ها پر می‌شود. مرزدانه‌ها از نظر کریستالی دارای نظم به مراتب کمتری نسبت به دانه‌ها دارند؛ به همین دلیل دارای مقاومت الکتریکی بالاتری هستند. علت آن را می‌توان در کوتاه‌تر بودن طول مسیر آزاد حرکت حامل‌های بار جستجو کرد. پیش‌تر اشاره شد که در شرایط عادی سرویس، برقگیر مانند یک عایق عمل می‌کند. با افزایش ولتاژ، دانه‌های اکسید روی به دلیل خاصیت نیمه هادی و مقاومت الکتریکی پایین‌تر نسبت به مرزدانه‌ها، آمادگی تبدیل شدن به یک هادی را پیدا می‌کنند؛ اما در همین حین مرزدانه‌ها به علت مقاومت الکتریکی بالاتر، همچنان عایق باقی می‌مانند. مرزدانه‌ها تا آستانه شکست دی‌الکتریک خود عایق باقی می‌مانند. با افزایش ناگهانی ولتاژ در طی یک حملات ولتاژی، مرزدانه دچار شکست دی‌الکتریک شده و رسانا می‌شود و تا عبور کامل اضافه ولتاژ گذرا، رسانا می‌ماند [۲-۴].

ظرفیت و عملکرد برقگیر تحت تأثیر عوامل مختلفی است. ساختار یک برقگیر ایده‌آل دارای دانه‌های اکسید روی با مقاومت الکتریکی کم و مرزدانه‌هایی با مقاومت الکتریکی و مقاومت به شکست دی‌الکتریک کافی است. هرچه مقاومت الکتریکی دانه‌ها کمتر باشد، خاصیت رسانش در هنگام بروز اضافه ولتاژ گذرا بهبود یافته و عملکرد برقگیر بهتر خواهد بود؛ همچنین افزایش مقاومت الکتریکی مرزدانه موجب افزایش ظرفیت برقگیر می‌شود. آستانه شکست دی‌الکتریک برقگیر باید با ولتاژ عملکردی تجهیزات مورد حفاظت تنظیم شود؛ البته کاهش مقاومت الکتریکی دانه‌ها و افزایش مقاومت الکتریکی مرزدانه‌ها در آن واحد به آسانی میسر نیست؛ از آنجاکه ترکیب شیمیایی این دو به هم نزدیک است، هر عاملی که موجب افزایش یا کاهش رسانایی شود، بر هر دوی آنها می‌تواند مؤثر باشد. آستانه شکست دی‌الکتریک برقگیر را می‌توان با کنترل عوامل فرایندی تولید، بر حسب نیاز، تنظیم نمود که در بخش بعدی به طور مفصل‌تر مورد بحث قرار می‌گیرد [۶].

۳- تولید قرص برقگیر

قرص‌های برقگیر اصولاً از روش متالورژی پودر تولید می‌شوند و خاصیت مقاومت غیرخطی آنها به‌خاطر این روش تولید است. فرایند ساخت برقگیر همان مراحل معمول مهندسی پودر، یعنی تولید پودر، اضافه کردن ترکیبات ثانویه، همگن‌سازی، شکل‌دهی پودر و در نهایت تفجوشی (sintering) هستند [۲].

۳-۱- پودر اکسید روی

امروزه پودر ZnO به روش‌های مختلف صنعتی و آزمایشگاهی قابل حصول است. این روش‌ها به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم دسته‌بندی شده و عمدتاً بر پایه حرارت دادن یک ماده حاوی ترکیبات روی و واکنش دادن با اکسیژن موجود در هوا هستند که در این مقاله مورد بحث قرار نخواهند گرفت [۴]. اندازه ذرات پودر ZnO مورد استفاده در ساخت برقگیرها معمولاً در حدود ۴ تا ۹ میکرون است. این پودر لازم است از نظر اندازه و شکل همگن باشد چرا که توزیع نامناسب اندازه و شکل پودر منجر به تفاوت در خواص الکتریکی دانه‌ها شده و در نهایت به افت خواص برقگیر می‌انجامد [۳-۵].

۳-۲- ترکیبات ثانویه

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد موادی در جهت بهینه‌سازی خواص برقگیر، افزایش چگالی نسبی نهایی و افزایش استحکام به مخلوط پودری اضافه می‌شود. این ترکیبات عمدتاً سرامیکی هستند؛ مانند CoO ، Bi_2O_3 ، Cr_2O_3 ، MnO که از مهم‌ترین آنها اکسید بیسموت است. این فاز از طریق ایجاد فاز مایع در بین دانه‌ها، موجب کاهش دما و زمان تفجوشی می‌شود. گاهی Y_2O_3 برای بهبود خاصیت نیمه هدایت اکسید روی به ترکیب اضافه می‌شود. یک ترکیب مشهور برقگیر که به ترکیب ماتسوکا معروف است؛ حاوی ۹۷٪ مولی ZnO، ۱٪ مولی Sb_2O_3 و ۰٫۵٪ مولی از هر کدام از سرامیک‌های Bi_2O_3 ، CoO ، MnO ، Cr_2O_3 است [۱]. اضافه کردن آلومینیوم نیز می‌تواند رسانش ZnO را افزایش دهد؛ اما باید توجه داشت که قرار گرفتن ذرات Al در مرز دانه می‌تواند مقاومت آن را کاهش دهد. در کنار این ترکیبات، برای کمک به فرایند شکل‌دهی، روانکار و چسب به میزان ۱٪ الی ۲٪ اضافه می‌گردد [۳-۴].

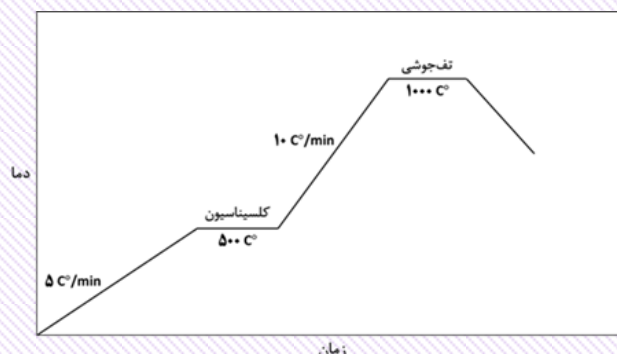
۳-۳- شکل دهی پودر

قرص‌های برقگیر همان‌طور که از نامشان پیداست به شکل قرص‌های دیسکی هستند. شکل ساده آنها موجب می‌شود فرایند شکل‌دهی به‌غایت ساده‌ای داشته باشند. ترکیب پودری برقگیر به‌وسیله دستگاه فشار سرد به شکل یک قرص درآمده و برای تفجوشی آماده می‌شود. اعمال فشار بیشتر باعث افزایش چگالی انباشت شده و فرایند تفجوشی را راحت‌تر می‌کند [۳].

۳-۴- تفجوشی

مرحله آخر در اغلب روش‌های تولید قطعه از طریق فرایندهای متالورژی پودر، مرحله تفجوشی است. تفجوشی یک فرایند نفوذی است و طی آن چگالی نسبی نمونه از محدوده ۶۰٪ الی ۷۰٪ به بالای ۹۰٪ درصد میرسد. تفجوشی پودر ZnO برای تولید برقگیر در محدوده دمایی 1000°C تا 1200°C درجه سانتی‌گراد است. مخلوط پودری شکل داده شده ابتدا در دمای حدود 500°C به مدت مشخصی کلسیناسیون می‌شود تا مواد اضافی نظیر چسب و روانکارها و همچنین رطوبت محبوس در میان ذرات پودری خارج شود. لازم است نرخ حرارت دهی در این مرحله کم باشد (معمولاً در حدود $5^\circ\text{C}/\text{min}$) تا فرصت کافی برای تبخیر و خروج

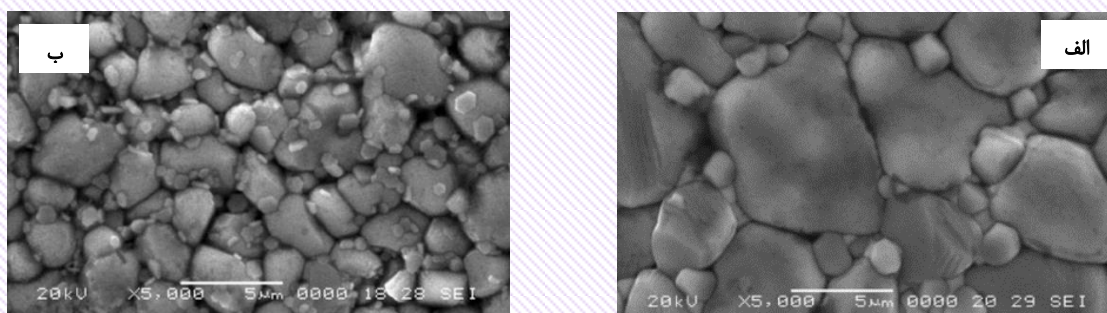
مواد اضافی وجود داشته باشد. پس از مرحله کلسیناسیون، دمای کوره تا محدوده اشاره شده برای انجام فرایند تفجوشی، بالا برده می‌شود. در این مرحله نرخ حرارت‌دهی در حدود $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ یا بالاتر است [۱-۲]. چرخه حرارتی کلی تفجوشی یک برقگیر اکسید روی در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- چرخه حرارتی کلی تفجوشی برقگیر اکسید روی [۱]

دمای تفجوشی می‌تواند بر عملکرد نهایی برقگیر بسیار موثر باشد. دمای تفجوشی بالاتر با کاهش تخلخل باعث افزایش چگالی نسبی و استحکام می‌شود؛ اما همزمان موجب رشد اندازه دانه می‌شود. افزایش اندازه دانه‌ها از طریق ادغام دانه‌های کوچک انجام می‌شود که این به معنای کاهش در تعداد مرز دانه‌ها است و از آنجایی که نقش مرزها در مکانیزم عملکرد برقگیر بسیار کلیدی بوده، کاهش تعداد آنها به معنای کاهش ظرفیت برقگیر است؛ در نتیجه لازم است یک دمای بهینه تفجوشی برای مخلوط پودری انتخاب شود؛ محدوده دمایی انتخاب شده متأثر از ترکیبات مخلوط پودری خواهد بود [۵].

شکل ۲ نمایشگر تصاویری از ریزساختار دو پودر زینتر شده پایه اکسید روی می‌باشد که به وسیله SEM تهیه شده‌اند. ترکیب شیمیایی هردو پودر در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲- تصاویر تهیه شده با SEM از ریزساختار زینتر شده برقگیر اکسید روی [۴]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودرهای الف و ب [۴]

ترکیب (%)	ZnO	Bi ₂ O ₃	Co ₂ O ₃	MnO ₂	Sb ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃
نمونه الف	۹۶,۰۵	۰,۷	۱,۰	۰,۵	۱,۰	۰,۵	۰,۲۵	۰
نمونه ب	۹۵,۵۵	۰,۷	۱,۰	۰,۵	۱,۰	۰,۵	۰,۲۵	۰,۵

این پودرها در دمای 1100°C به مدت دو ساعت تفجوشی شده‌اند. حاصل آن ریزساختاری با دانه‌های زمینه ZnO به عنوان فاز اصلی و فازهای بین دانه‌ای است. همانگونه که از شکل ۲ مشخص است، افزودن Y_2O_3 موجب کاهش در اندازه دانه ZnO شده است؛ این کاهش به بهبود خواص الکتریکی برقگیر می‌انجامد [۴].

۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده شد خاصیت حفاظتی قرص برقگیر، نتیجه ساختار زینتر شده آن است که به‌رغم فرایند نه‌چندان پیچیده تولید، در حفاظت از تجهیزات گران‌قیمت الکتریکی نقش بسیار شگرفی ایفا می‌کند. به‌کارگیری قرص‌های برقگیر در خطوط انتقال برق علاوه بر کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، موجب افزایش ایمنی خطوط در شرایط غیرعادی می‌شود؛ از این‌رو مطالعه و تلاش در جهت افزایش بهره‌وری آنها می‌تواند همچنان مفید واقع شود.

مراجع

- [۱] نعمتی، زیارت علی، نوایی الوار، حسن، هوشیار فرد، محمدعلی، و فقیهی ثانی، محمدعلی. (۱۳۸۶). ریزساختار برقگیرهای تهیه شده از پودر نانومتری و بررسی اثرات استفاده از این پودر بر خواص اکسیدروی. مهندسی صنایع و مدیریت (شریف ویژه علوم مهندسی)، ۳۹(۲۳) ۴۱-۴۶. <https://sid.ir/paper/107713/fa>. SID.
- [۲] Peng, L., Zhang, C., Wang, Z., Liu, Y., & Zhang, D. (۲۰۱۹). Improving the protective effect of surge arresters by optimizing the electrical property of ZnO varistors. Electric Power Systems Research, ۱۷۷, ۱۰۶۰۴۱. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106041>
- [۳] Zhang, Y., Liu, S., & Li, Y. (۲۰۱۳). Synthesis and characterization of nanostructured ceramic oxides with large specific surface area. Ceramics International, ۳۹(۱), ۳۵۹-۳۶۶. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.08.067>
- [۴] Wang, Y., Luo, G., Yang, Z., & Wei, W. (۲۰۱۲). Investigation of the microstructure and electrochemical performance of nanostructured $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ cathode material for lithium-ion batteries. Chemical Engineering Journal, ۱۹۷, ۲۱۷-۲۲۵. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.076>
- [۵] Li, G., Huang, W., & Zhang, W. (۲۰۰۹). An investigation on the electrical characteristics and reliability of HfO_2 gate dielectrics with various annealing treatments. Microelectronics Reliability, ۴۹(۱۰), ۱۱۴۶-۱۱۵۱. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2009.06.008>

نویسنده: محمد مزبانی پور

