دانشکده فنی و مهندسی

تهیه نانوپودر کاربید زیرکونیم و بررسی خواص پودر حاصل

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی مهندسی مواد گرایش سرامیک

استاد راهنما

دکتر سعید باغشاهی

دکتر بهمن میرهادی

نام دانشجو

محمود شایسته‌فر

اسفند ۱۳۹۰

دانشکده فنی و مهندسی

گروه علم و مهندسی مواد

تهیه نانوپودر کاربید زیرکونیم و بررسی خواص پودر حاصل

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی مهندسی مواد گرایش سرامیک

استاد راهنما

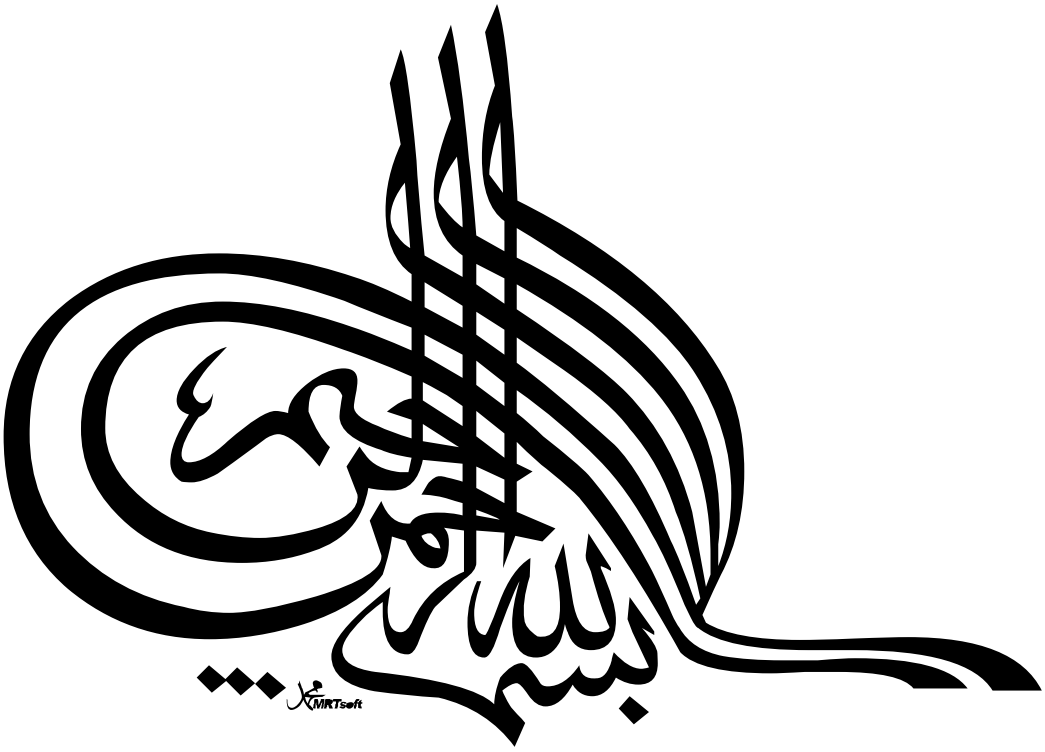
دکتر سعید باغشاهی

دکتر بهمن میرهادی

نام دانشجو

محمود شایسته‌فر

اسفند ۱۳۹۰


بسم الله الرحمن الرحیم
MRTsoft

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

تشکر وقدرانی

خداوندا از تو سپاس‌گذارم که مرا ذهنی عطا کردی مشتاق آموختن و دلی
مشتاق عشق ورزیدن از تو سپاس‌گذارم که مرا یاری هیچ نبود و تو به همه چیز توانایم کردی و مرا
یارای حرکت نبود و تو پویایم کردی از تو متشکرم به خاطر نقطه‌ای که اینک در آن ایستاده‌ام

از پدر و مادر مهربانم به خاطر تمام فداکاری‌هایشان سپاس فراوان دارم

از اساتید عزیزم جناب آقای دکتر باغشاهی و جناب آقای دکتر میرهادی به خاطر زحماتشان سپاسگذارم

از تمام اساتید گروه مواد کمال تشکر و سپاس را دارم

درپایان از تمام کسانی‌که به هر نحو مرا در انجام این پایان نامه یاری رساندند و ذکر نامشان در این
مجال مختصر نمی‌گنجد کمال سپاس را داشته و از خداوند متعال برایشان آرزوی سربلندی را دارم

چکیده

از روش سل ژل معمولاً برای سنتز پودرهای اکسیدی استفاده می‌شود اما دراین تحقیق یک پودر کاربیدی با این روش سنتز شده است. از زیرکونیم پروپکساید و ساکاروز به ترتیب به عنوان منابع تامین کننده زیرکونیم و کربن استفاده شده است. اسید استیک و هیدروکسد آمونیم نیز از دیگر مواد اولیه است. برای تهیه محلول سل، ابتدا زیرکونیم پروپکساید و ساکاروز با نسبت مولی C/Zr برابر ۳، ۴/۵ و ۶ مخلوط شدند. سپس سل مورد نظر در دمای ۴۰℃ به منظور تهیه ژل مورد عملیات هم‌زدن قرار گرفت. به دنبال آن ژل حاصل در دمای ۱۲۰℃ و زمان ۳ ساعت تحت عملیات خشکایش قرار گرفت. در نهایت زیروژل حاصل در دماهای ۱۴۰۰℃ و ۱۴۸۰℃ به منظور انجام واکنش احیاء کربوترمال و تهیه پودر کاربیدی مدنظر، تحت عملیات حرارتی قرار گرفت.

در این تحقیق اثر ترکیب، PH و دما بر روی اندازه و مورفولوژی پودرهای سنتز شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج آنالیز XRD نشان داد اندازه بلورک‌های ایجاد شده در محدوده نانومتر می‌باشد. همچنین تحقیقات نشان داد افزایش PH و C/Zr سبب کاهش محدوده اندازه ذرات می‌شود. مشخص شد افزایش دما سبب افزایش خلوص ترکیب می‌شود. هم‌چنین الگوی پراش XRD نشان داد افزایش دما سبب بزرگ‌تر شدن اندازه بلورک‌ها شده از طرفی سبب بلندتر و تیزتر شدن شدت پیک‌ها نیز می‌شود.

کلمات کلیدی:

نانو پودر، کاربید زیرکونیم، سل ژل

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فصل اول: مقدمه ۱

فصل دوم: مروری برمنابع مطالعاتی ۴

۲-۱- تعریف و طبقه بندی کاربیدها ۴

۲-۲- سیستم ZrC ۶

۲-۳- خواص فیزیکی ZrC ۷

۲-۳-۱- دانسیته و نقطه ذوب ۷

۲-۳-۲- خواص الکتریکی ۸

۲-۳-۳- خواص حرارتی ۹

۲-۴- خواص مکانیکی ۱۱

۲-۴-۱- سختی ۱۱

۲-۵- کاربرد کاربید زیرکونیم ۱۳

۲-۶- روش‌های تولید کاربید زیرکونیم ۲۰

۲-۶-۱- فرآوری بر مبنای فاز جامد ۲۱

۲-۶-۱-۱- روش خوداحتراقی دما بالا ۲۱

۲-۶-۱-۲- روش متاتزی حالت جامد ۲۶

۲-۶-۱-۳- واکنش مستقیم Zr و یا هیدرید زیرکونیم با کربن ۲۷

۲-۶-۱-۴- احیاء کربوترمال ۲۸

۲-۶-۲- فرآوری بر مبنای فاز مایع ۳۱

۲-۶-۲-۱- سل ژل ۳۱

۲-۶-۲-۱-۱- مراحل فرآیند سل ژل ۳۲

۲-۶-۲-۱-۲- مکانسیم‌های فرآیند سل ژل ۳۵
۲-۶-۲-۱-۳- طبقه‌بندی سل‌ها ۳۶
۲-۶-۲-۱-۴- پارامترهای موثر بر روی سرعت واکنش ۳۷
۲-۶-۲-۱-۵- مزایا و معایب فرآیند سل ژل ۳۸
۲-۶-۲-۱-۶- کاربردها ۳۸
۲-۶-۲-۲- ریسندگی الکتریکی ۴۱
۲-۶-۳- فرآوری بر مبنای فاز گاز ۴۲
۲-۶-۳-۱- رسوب شیمیایی بخار ۴۲
۲-۶-۳-۲- کاتد پرانی ۴۳
فصل سوم: روش پژوهش ۴۴
۳-۱- مواد اولیه مصرفی ۴۴
۳-۲- روش انجام آزمایش ۴۶
۳-۳- آنالیزهای انجام شده بر روی پودرها ۴۷
فصل چهارم: نتایج و بحث ۵۰
۴-۱- آنالیز گرمایی ۵۰
۴-۲- بررسی واکنش‌های انجام شده ۵۳
۴-۳- عملیات پیرولیز ۵۵
۴-۴- بررسی اثرpH ۶۱
۴-۴-۱- نمونه اول ۶۲
۴-۴-۲- نمونه دوم ۶۲
۴-۴-۳- نمونه سوم ۶۳
۴-۵- بررسی نسبت C/Zr ۷۶
۴-۵-۱- نمونه چهارم ۷۶

۴-۵-۲- نمونه پنجم ۷۷
۴-۵-۳- نمونه ششم ۷۸
۴-۶- بررسی اثر دما ۸۷
۴-۶-۱- نمونه هفتم ۸۷
۴-۶-۲- نمونه هشتم ۸۷
فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادها ۹۶
۵-۱- جمع‌بندی ۹۶
۵-۲- پیشنهادها ۹۸
منابع و مراجع ۹۹

فهرست جدول‌ها

عنوان ..... صفحه
جدول ۲-۱ مقایسه دانسیته و نقطه ذوب کاربیدهای بین نشین ۷
جدول ۲-۲ خواص الکتریکی کاربیدهای بین نشین گروه چهار ۹
جدول ۲-۳ خواص حرارتی کاربیدهای بین نشین گروه چهار ۹
جدول ۲-۴ خواص مکانیکی کاربیدهای بین نشین گروه چهار ۱۲
جدول ۲-۵ مشخصات و خواص کاربید زیرکونیم ۱۴
جدول ۲-۶ مقایسه پارامترهای خوردگی پوشش‌های روی فولاد مورد آزمایش ۱۹
جدول ۳-۱ مشخصات زیرکونیم پروپکساید ۴۴
جدول ۳-۲ مشخصات اسید استیک ۴۵
جدول ۳-۳ مشخصات ساکاروز ۴۵
جدول ۳-۴ مشخصات هیدروکسید آمونیوم ۴۶
جدول ۳-۵ آزمایشات انجام شده با تغیر پارامترهای دما، ترکیب و pH ۴۸
جدول ۴-۱ اندازه کریستالیت‌ها در دمای ۵۰۰-۹۰۰°C ۶۰
جدول ۴-۲ اندازه کریستالیت‌ها براساس pH ۶۸
جدول ۴-۳ تغیرات پارامتر شبکه بر اساس pH ۶۸
جدول ۴-۴ اندازه ذرات براساس pH ۷۵
جدول ۴-۵ اندازه کریستالیت‌های نمونه ۴ تا ۶ ..... ۷۹
جدول ۴-۶ پارامتر شبکه ZrC بر حسب C/Zr ۸۰
جدول ۴-۷ اندازه ذرات بر حسب C/Zr ۸۴
جدول ۴-۸ تاثیر دما بر اندازه کریستالیت‌ها ۸۹
جدول ۴-۹ اندازه ذرات نمونه‌های ۷ و۸ بر حسب دما ۹۲

فهرست شکل‌ها

عنوان ..... صفحه
شکل ۲-۱ جدول تناوبی عناصر به همراه عناصر تشکیل دهنده کاربیدهای بین‌نشین ۵
شکل ۲-۲ دیاگرام فازی سیستم Zr-C ۶
شکل ۲-۳ دمای ذوب کاربیدهای بین‌نشین.....۸
شکل ۲-۴ هدایت حرارتی کاربیدهای گروه ۴ به صورت تابعی از دما ۱۰
شکل ۲-۵ انبساط حرارتی کاربیدهای بین‌نشین به صورت تابعی از دما ۱۰
شکل ۲-۶ سختی کاربیدهای دیرگداز به صورت تابعی از نسبت فلز به کربن ۱۲
شکل ۲-۷ تاثیر حضور ZrC در کاهش نرخ سایش کامپوزیت کربن/ کربن ۱۸
شکل ۲-۸ تصویر افروزش مواد در واکنش خوداحتراقی دما بالا.....۲۲
شکل ۲-۹ تاثیر آهن در کاهش دمای آدیاباتیک و احتراق ۲۵
شکل ۲-۱۰ مراحل روش سل ژل ۳۵
شکل ۲-۱۱ فناوری سل ژل و محصولات آن ۳۹
شکل ۳-۱ نمودار شماتیک روش انجام کار در به وسیله سل ژل ۴۹
شکل ۴-۱ نمودار آنالیز گرمایی.....۵۰
شکل ۴-۲ تغیرات انرژی آزاد گیبس با دمای واکنش احیاء کربوترمال.....۵۲
شکل ۴-۳ الگوی XRD نمونه پیرولیز شده در دمای ۵۰۰℃ با زمان یک ساعت.....۵۶
شکل ۴-۴ الگوی XRD نمونه پیرولیز شده در دمای ۶۰۰℃ با زمان یک ساعت ۵۷
شکل ۴-۵ الگوی XRD نمونه پیرولیز شده در دمای ۷۰۰℃ با زمان یک ساعت ۵۸
شکل ۴-۶ الگوی XRD نمونه پیرولیز شده در دمای ۸۰۰℃ با زمان یک ساعت ۵۸
شکل ۴-۷ الگوی XRD نمونه پیرولیز شده در دمای ۹۰۰℃ با زمان یک ساعت.....۵۹
شکل ۴-۸ اندازه کریستالیت‌ها بر حسب دما ۶۰

شکل ۴-۹ الگوی XRD نمونه اول با pH =۳/۲ ..... ۶۴
شکل ۴-۱۰ الگوی XRD نمونه دوم با pH =۴/۷ ..... ۶۵
شکل ۴-۱۱ الگوی XRD نمونه سوم با pH =۶/۲ ..... ۶۶
شکل ۴-۱۲ نمودار تغیرات پارامتر شبکه بر حسب pH ۶۹
شکل ۴-۱۳ تغیرات پارامتر شبکه بر اساس میزان کربن موجود در ساختار ۷۰
شکل ۴-۱۴ تغیرات پارامتر شبکه بر اساس میزان اکسیژن موجود در ساختار ۷۰
شکل ۴-۱۵ تصاویر SEM نمونه اول ۷۲
شکل ۴-۱۶ تصاویر SEM نمونه دوم ۷۳
شکل ۴-۱۷ تصاویر SEM نمونه سوم ۷۴
شکل ۴-۱۸ الگوی XRD نمونه پنجم با C/Zr=۴/۵ ..... ۷۷
شکل ۴-۱۹ الگوی XRD نمونه ششم با C/Zr=۶ ..... ۷۸
شکل ۴-۲۰ تغیرات پارامتر شبکه بر اساس C/Zr ۸۰
شکل ۴-۲۱ تصاویر SEM نمونه پنجم ۸۲
شکل ۴-۲۲ تصاویر SEM نمونه ششم ۸۳
شکل ۴-۲۳ تصویر EDX نمونه ۶ ..... ۸۶
شکل ۴-۲۴ الگوی XRD نمونه شماره ۷ ..... ۸۸
شکل ۴-۲۵ نمودار تاثیر دما بر اندازه پارامتر شبکه ۸۹
شکل ۴-۲۶ تصاویر SEM نمونه هفتم ۹۱
شکل ۴-۲۷ الگوی XRD کاربید زیرکونیم ۹۳
شکل ۴-۲۸ الگوی XRD کاربید زیرکونیم ۹۴

فصل اول:

مقدمه

از جمله صنایعی که در دهه‌های گذشته پیشرفت چشمگیری در عرصه‌های گوناگون به خود دیده است، صنعت سرامیک است. اگرچه بخش وسیعی از صنعت سرامیک را سرامیک‌های سنتی یا سیلیکاتی تشکیل داده‌اند، اما در دهه‌های اخیر سرامیک‌های جدید با خواص و کاربردهای متنوع توسعه یافته‌اند. این سرامیک‌ها دارای خواص بی‌نظیری مانند مقاومت حرارتی و شیمیائی بالا و خواص مکانیکی خوب هستند. از آن جمله می‌توان به کاربیدهای سرامیکی که دسته مهمی از محصولات سرامیکی را شامل می‌شوند، اشاره نمود.

کاربیدها مواد بسیار مفید برای کاربردهای صنعتی هستند. این مواد به علت نقطه ذوب بالا، پایداری فازی و مقاومت به شوک حرارتی همواره مورد توجه می‌باشند. کاربیدها همچنین استحکام دما بالای بسیار مناسبی دارند و در محدوده دمایی بالای ۱۰۰۰°C بسته به ترکیب استوکیومتری آن‌ها انتقال حالت تردی به نرمی را نشان می‌دهند. کاربیدها خصوصاً کاربیدهای دیرگداز هر روز اهمیت بیشتری در صنعت پیدا می‌کنند و علت این امر خواص مطلوب آن‌ها ازقبیل استحکام بالا، سختی زیاد، مقاومت به خوردگی خوب و دیرگدازی است که می‌توان از آن‌ها در کاربردهای متفاوتی استفاده نمود. نمونه‌ای از این کاربردها عبارتند از:

کامپوزیت‌های دما بالا، کاربردهای خودروسازی و هوافضا، دیرگدازها و المنت‌های حرارتی کوره، زره‌های سرامیکی، کاربردهای هسته‌ای و تشعشعی و کاربردهای الکترونی و نوری.

یکی از انواع کاربیدهای سرامیکی، کاربید زیرکونیم است که اگرچه دارای خواص جالب و متنوعی می‌باشد اما به دلیل پیچیدگی وپرهزینه بودن فرآیندهای تولید، هنوز کاربردهای وسیعی در صنعت پیدا نکرده است. این ماده از جمله ترکیبات سخت شناخته شده با سختی حدود $۲۶۰۰kg/mm^۲$ می‌باشد. ازخواص برحسته این کاربید می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- سختی بالا
- نقطه ذوب بالا

- مقاومت در برابر خوردگی
- هدایت الکتریکی و حرارتی بالا

کاربید زیرکونیم به دلیل نقطه ذوب بالا، پایداری فاز جامد و مقاومت خوب در برابر شوک‌های حرارتی از پتانسیل زیادی برای کار در شرایط دما بالا برخودار می‌باشد. از طرف دیگر به دلیل سختی زیاد و مقاومت به سایش بالایی که دارد قابلیت کاربرد در ابزارهای برشی و مقاوم به سایش را نیز دارد.

از آنجا که توزیع، مورفولوژی، خلوص ودرجه کریستالی بودن مواد به روش تولید آن‌ها بسیار وابسته است، بنابراین روش فرآوری کاربیدها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. برخلاف بسیاری از مواد سرامیکی مثل اکسیدها که می‌توانند از مواد خام موجود در طبیعت تولید گردند، کاربیدها معمولاً به صورت طبیعی وجود ندارند. سنتز این مواد پر هزینه و مشکل است چرا که این مواد علاوه بر دیرگدازی بالا، از لحاظ شیمیایی نیز به میزان زیادی خنثی هستند و معمولاً یک تمایل کلی به تجزیه شدن در حین ذوب از خود نشان می‌دهند. در نتیجه آن‌ها نمی‌توانند به سهولت توسط تکنیک‌های متالورژیکی معمول نظیر ریخته‌گری تهیه شوند و همچنین نمی‌توانند به صورت عادی و بدون کمک زینترها، زینتر گردند.

در چند دهه گذشته تکنیکـ های مختلفی برای تولید این مواد توسعه یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- احیاء کربوترمال
- سنتز خوداحتراقی دما بالا
- رسوب شیمیایی فاز بخار

معمولاً مخلوط‌های پودری کربن و زیرکونیم، هیدرید زیرکونیم (ZrH_2) و یا اکسید زیرکونیم (ZrO_2) برای واکنش وتولید کاربید زیرکونیم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از آنجائی که مواد اولیه در مقیاس نسبتاً بزرگ (عموماً در حد میکرومتر) می‌باشند، معمولاً دماهای بالایی برای واکنش‌های مورد نظر خصوصاً احیاء کربوترمال لازم است. بنابراین پودرهای تولید شده عموماً درشت سایز می‌باشند. بر این اساس فرآیند پرس برای تولید قطعات با دانسیته مناسب ضروری به نظر می‌رسد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد درصورتیکه از روش‌های مبتنی بر مواد اولیه محلول استفاده شود دمای فرآیند تهیه پودرها به مراتب کم می‌شود. معمولاً سرعت نفوذ واکنشگرها در فاز مایع چندین برابر بیشتر از فاز جامد است به همین دلیل سنتز مواد در فاز مایع در دمای کمتری انجام شده و از رشد دانه‌ها نیز ممانعت می‌شود. روشهای شیمیایی دارای برتری‌هایی از نقطه نظر یکنواختی شیمیایی و قابل کنترل بودن پارامترها به منظور کنترل جوانه‌زنی و رشد ذرات در مقایسه با اغلب روشهای دیگر می‌باشند.

در بین روش‌های شیمیایی، سل ژل را می‌توان متداول‌ترین روش تولید نانوذرات در فاز مایع دانست. دلیل این موضوع به سهولت روش، عدم نیاز به تجهیزات ویژه و تنوع محصولات تولیدی برمی‌گردد.

با وجود پیشرفت‌های حاصل شده در کاربردهای مهندسی نیاز به پودرهای پیشرفته که توانائی کار در شرایط خاص و حساس را داشته باشند هنوز احساس می‌شود. نانوپودرها پاسخگوی نیاز این قطعات و بسیاری از کاربردهای مهندسی خواهند بود. چنین پیشرفتی در صنعت مواد پودری، طراحان را قادر خواهد ساخت تا خواص مواد را در مقیاس اتمی دستکاری کنند و قطعات مورد نیاز را برای کاربردهای ویژه تولید کنند.

از این‌رو با توجه به بهبود خواص مواد در مقیاس نانو و نیز مزایای روش سل ژل هدف از انجام این پایان‌نامه سنتز نانو پودرکاربید زیرکونیم به روش سل ژل می‌باشد.

فصل دوم:

مروری بر منابع مطالعاتی

۲-۱- تعریف و طبقه بندی کاربیدها

عنصر کربن معمولاً با عناصر دیگر از قبیل اکسیژن، کلر و غیره ترکیب شده و ترکیباتی نظیر CO_2 و CCl_4 را تشکیل می‌دهد، اما کاربید تنها به ترکیباتی اطلاق شده که در آن عنصر مورد نظر الکترونگاتیویته برابر یا کمتر از کربن داشته باشد [۱].

به این ترتیب براساس تعریف ، کاربیدها به چهار دسته طبقه بندی می‌شوند:

۱- کاربیدهای بین نشین[۱]:

از ترکیب کربن با عناصر واسطه گروه‌های ۴، ۵ و ۶ به دست می‌آیند.

۲- کاربیدهای میانی یا واسط[۲]:

از ترکیب کربن با عناصر واسطه گروه‌های ۷و۸ به دست می‌آیند.

۳- کاربیدهای کوالانت:

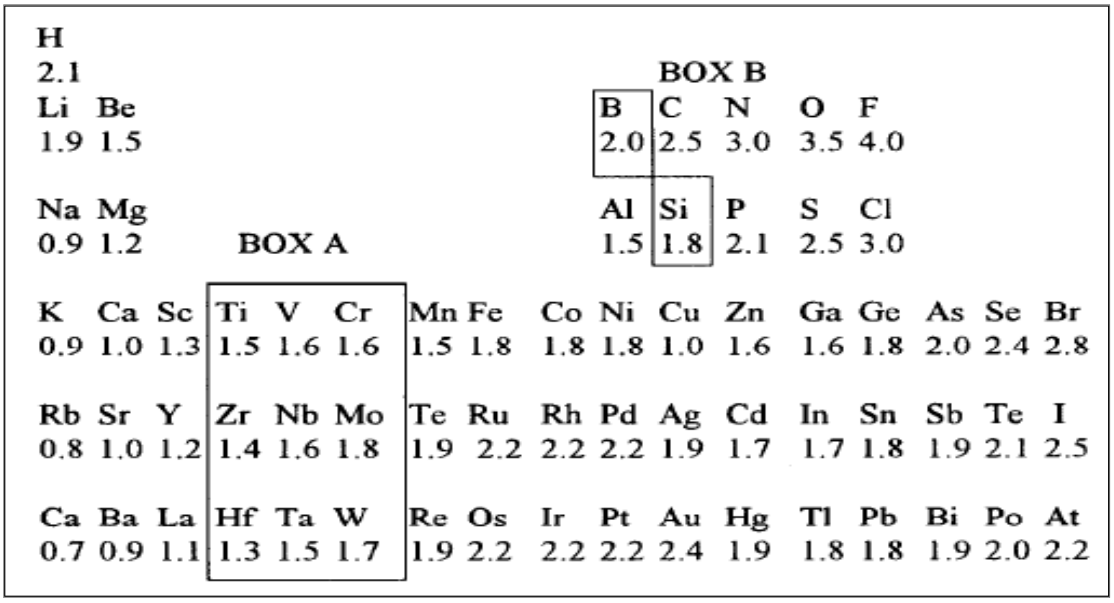
از ترکیب کربن با عناصر بور و سیلیسیم به دست می‌آیند.

۴- کاربیدهای شبه نمکی[۳]:

از ترکیب کربن با عناصر گروه‌های ۱،۲و۳ به دست می‌آیند.

به عنوان کاربیدهای دیرگداز تنها کاربیدهای بین‌نشین و کوالانت که نقطه ذوب آن‌ها بیشتر از ۱۸۰۰ °C است مطرح بوده و کاربیدهای میانی و نمکی به عنوان دیرگداز مطرح نیستند. شکل زیر عناصر جدول تناوبی به همراه الکترونگاتیویته آن‌ها و همچنین عناصری که تشکیل دهنده کاربیدهای دیرگداز هستند را با کادر مشخص، نشان می‌دهد [۱].

۱. interstitial carbides
۲. intermediate carbides
۳. salt-like carbides



شکل (۲-۱) جدول تناوبی عناصر به همراه عناصر تشکیل دهنده کاربیدهای بین‌نشین با کادر مشخص[۱]

کاربید زیرکونیم ترکیبی با فرمول ZrC و دارای ساختار مکعبی فشرده نمک طعام است [۲]. از آنجایی‌که اندازه اتم کربن بسیار کوچکتر از اتم زیرکونیم است، بنابراین کربن می‌تواند در مواضع بین نشین شبکه قرار گیرد و به همین دلیل این نوع کاربیدها به نام کاربیدهای بین نشین شهرت پیدا کرده‌اند. در این کاربید نسبت شعاع اتمی کربن به زیرکونیم ۰/۴۸۳ می‌باشد. اتصال این کاربیدها کمتر کووالانت و یونی و بیشتر فلزی بوده که بیانگر طبیعت فلزی این کاربیدها است. مشابه فلزات، کاربیدهای بین‌نشین هدایت الکتریکی و گرمایی بالا دارند [۱].

کاربید زیرکونیم یکی از ترکیبات سخت شناخته شده با سختی حدود $۲۶۰۰kg/mm^۲$ می‌باشد. این خاصیت به ماده فوق این امکان را می‌دهد که در ابزارهای برشی و پوشش‌های ضد سایش به کار برده شود [۲].

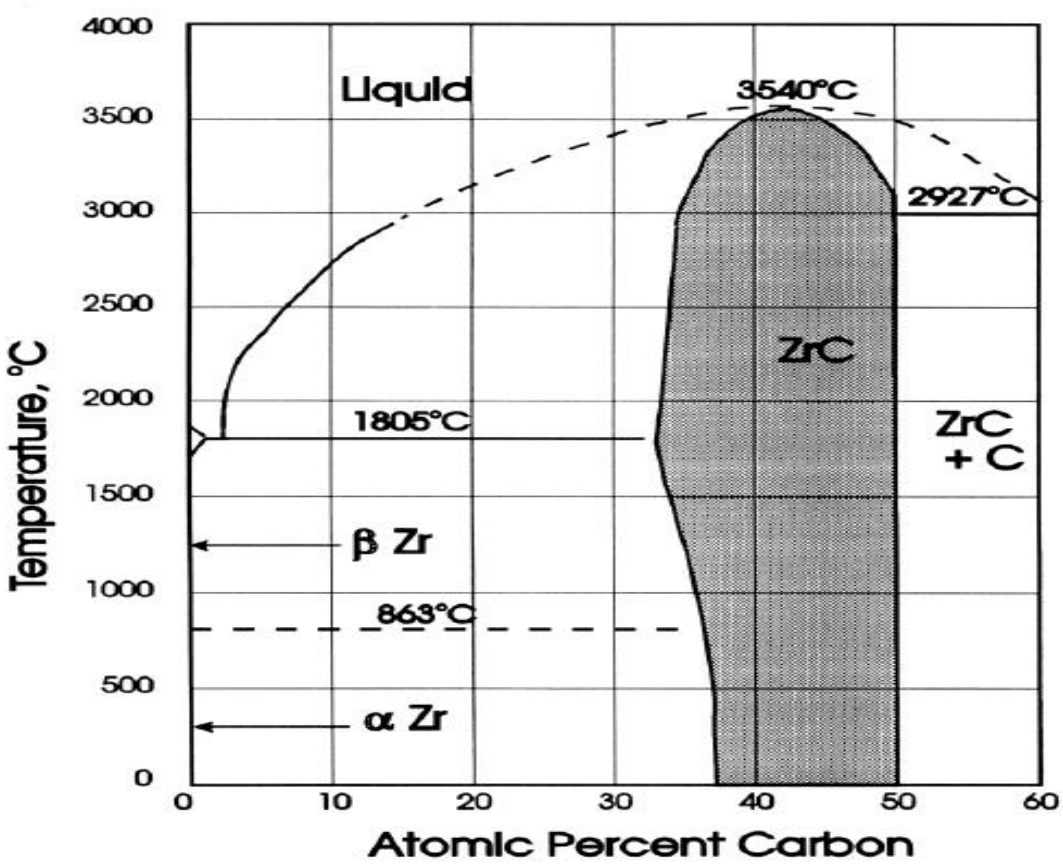
از آنجایی‌که این ماده دارای نقطه ذوبی بالا حدود $۳۵۰۰^{\circ}C$، پایداری فاز جامد، و از خواص ترمومکانیکی و ترموشیمیایی خوبی بهره‌مند است، از پتانسیل خوبی برای کاربردهای دما بالا برخوردار می‌باشد [۳]. به‌علت پیوندهای قوی و دمای ذوب بالا، کاربید زیرکونیم از قابلیت زینترینگ کمی برخوردار است از این‌رو جهت زینترینگ این ماده از کمک زینترهای فلزی نظیر مولیبدن و تنگستن و یا از ترکیباتی نظیر

$MoSi_2$ استفاده می‌شود. برای تهیه ZrC با دانسیته ۹۸٪ نیاز به دماهای بالای ۲۳۰۰℃ و فشار زیاد حدود ۵۰MPa می‌باشد [۴].

کاربید زیرکونیم درمحدوده وسیعی از ترکیبات استوکیومتری (از ZrC_{1-x} تا ZrC) تهیه می‌شود. از آنجایی‌که کاربیدهای بین نشین اساساً ترکیباتی غیر استوکیومتری هستند، لذا اغلب تغییراتی در خواص گزارش شده در متون یافت می‌شود که بیانگر این ویژگی است.

۲-۲- سیستم Zr – C

سیستم Zr – C شامل یک ترکیب غیراستوکیومتری است که ناحیه پهنی را شامل می‌شود.



شکل (۲-۲) دیاگرام فازی سیستم $Zr - C$ [۱]