

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

مروری بر سרمت‌ها و کاربیدهای سمانته

مقاله پژوهشی

رضا ایران‌خواه^۱، هادی اصغری^{۲*}

۱- استادیار، گروه سرامیک، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
* r.irankhah@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳	در سال‌های اخیر استفاده از سرمت‌ها به دلیل خواص جالب آن‌ها که ترکیبی از خواص سرامیک‌ها و فلزات است، رشد قابل توجهی در صنایع مختلف یافته است. انواع متفاوتی از سرمت‌ها، بسته به ترکیب شیمیایی آن‌ها، وجود دارند. در این مقاله، اطلاعاتی خلاصه از سرمت‌ها و کاربیدهای سمانته ارائه شده است. کاربیدهای سمانته دارای طیف وسیعی از کاربردها در صنایع مختلف مانند ابزار برش در ماشین کاری، اجزاء مته‌ها، ابزار برش سنگ و معدن کاری، قالب‌های کشش سیم و... می‌باشند. برخی از کاربیدهای سمانته معرفی شده به صورت محصولات تجاری و برخی دیگر نیز مانند سرمت‌های پایه کاربید نیوبیم در حد تحقیقاتی بوده که در آینده برای حل مشکلات مرتبط مورد استفاده قرار خواهند گرفت. از جمله کاربیدهای سمانته تجاری می‌توان به کاربیدهای ریزدانه یا کاربیدهای حاوی فاز گاما و کاربیدهای گرادانی عاری از فاز گاما اشاره نمود. هدف اصلی مقاله ارائه اطلاعاتی در مورد سرمت‌ها و کاربیدهای سمانته برای مهندسان، محققین و علاقه‌مندان به این حوزه است.
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۹	
کلید واژگان:	
سرمت	
کاربید سمانته	
کاربید تنگستن - کبالت	
کاربید گرادانی	
بایندر	
اینسرت	
ساخت افزایشی	

Overview of the Cermets and Cemented Carbides

Reza Irankhah¹, Hadi Asghari^{2*}

1. Assistant prof, Department of Ceramic, Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
 2. MSc student of Materials Engineering, Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
- * r.irankhah@semnan.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

Keywords:

Cermet
Cemented Carbide
WC-Co
Gradient Carbide
Binder
Insert
Additive Manufacturing.

Abstract

In recent years, the use of cermets has shown significant growth in the industry due to their interesting features that combine properties of metals and ceramics. There are different possible types of cermets, depending on their compositions. In this article, we have presented brief information about cermets and cemented carbides. Cemented carbides cover a wide range of applications in many relevant industries, i.e., cutting tools for machining, components of drill bits, rock tools and mining, or as wear parts in wire drawing dies and etc. Some of the introduced cemented carbides are established in products (i.e., fine-grained or γ -phase containing carbides; γ -phase free gradient carbides) and other microstructures are research trends focusing on solving present and future needs (i.e., NbC-cermets). The paper aim is to serve as an introduction to cemented carbide and cermets for engineers, researchers and scientists.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Reza Irankhah, Hadi Asghari, Overview of the Cermets and Cemented Carbides, New Process in Material Engineering, 2025, 19(3), 45-76.

۱- مقدمه

۱-۱- هارد متال‌ها و کاربیدهای سمانته

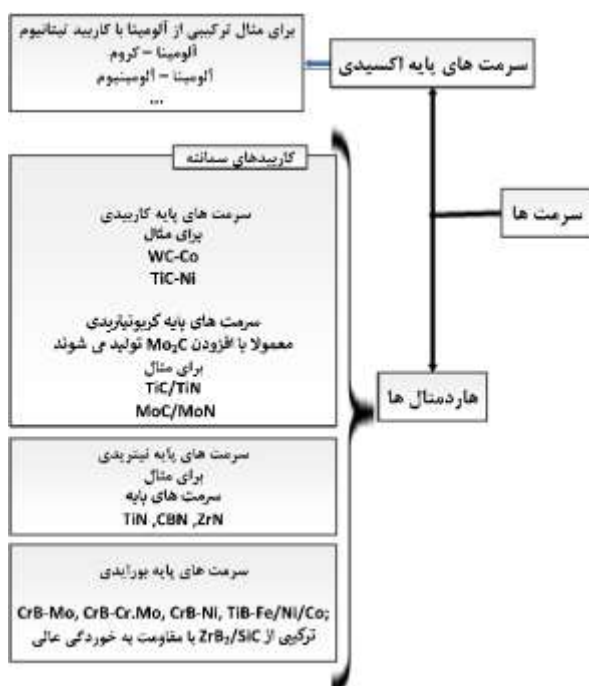
هارد متال^۱ و کاربید سمانته^۲ دو عبارت کاملاً معادل یکدیگر می‌باشند؛ اما اصطلاح "هارد متال" بیشتر در اروپا (در آلمان) و اصطلاح "کاربید سمانته" بیشتر در آمریکا و همچنین در منابع انگلیسی اروپایی استفاده می‌شود. در صنعت ماشین‌کاری، هارد متال‌های حاوی فاز غالب WC، از زمان کشف آن‌ها توسط شرودر^۳، معمولاً با نام "کاربیدهای سمانته" شناخته می‌شوند. هارد متال‌ها بر اساس کمیته ایزو TC29 در آوریل ۱۹۵۸ و استاندارد آلمانی DIN4990 در سال ۱۹۴۸ طبقه‌بندی شده‌اند [۱].

۱-۲- سרمت‌ها

تعاریف متفاوتی برای سרمت^۴ وجود دارد. تعریف سרمت توسط جرمن^۵: یک سרمت کامپوزیتی است که متشکل از ذرات سرامیکی پیوند یافته با زمینه فلزی باشد [۲]. در تعریفی دیگر که توسط گولسکا و اتمیر^۶ ارائه شده است، سرمت‌ها به‌طور خلاصه به‌عنوان هارد متال‌هایی تف‌جوشی شده بر پایه TiC, Ti(CN) می‌باشند که عاری از WC-Co باشند [۳]. ماری^۷ سرمت‌ها را بدین گونه تعریف می‌کند: نام سرمت از نظر تاریخی برای هارد متال‌های پایه TiC به کار برده می‌شود که در آن‌ها بر مشخصه مهم سرامیک TiC (هدایت الکتریکی کمتر) در مقایسه با WC تأکید می‌گردد. در بین کاربیدهای سمانته، سیستم‌های پایه WC-Co بسیار گسترده هستند، در حالی که سرمت‌های پایه TiC شامل ترکیباتی محدود با فرمول شیمیایی $TiC_xNi_{1-x}-Mo-Ni$ می‌باشند [۴]. در نهایت، لنگویر^۸ تعریفی دقیق‌تر از سرمت را به صورت زیر ارائه داده است: سرمت‌ها بر پایه $Ti(C,N)$ می‌باشند که دارای یک فاز سخت خالص و مکعبی هستند. این مواد در نرخ‌های برش بالا، در مقایسه با هارد متال‌های WC-Co، مقاومت به سایش بالاتری دارند. آن‌ها همچنین دارای طول عمر بالایی بوده و کیفیت سطحی خوبی در مواد ماشین‌کاری شده ایجاد می‌کنند. ذرات سخت سرمت‌ها معمولاً دارای ساختار هسته-حلقه^۹ بوده که در اثر برهم‌کنش بین فاز اتصال‌دهنده (چسب یا بایندر)^{۱۰} فلزی و

فازهای سخت در فرآیند تف‌جوشی در فاز مایع تشکیل می‌شوند. هسته‌های ذرات سخت، غنی از نیتروژن بوده که توسط حلقه‌هایی غنی از مولیبدن و تنگستن محاصره می‌شوند. تشکیل چنین حلقه‌هایی منجر به بهبود ترشوندگی^{۱۱} توسط بایندر فلزی و بنابراین ایجاد خواص عالی در آن‌ها خواهد شد [۵]. در این مقاله، برخی از معروف‌ترین سیستم‌های سرمت، ساختار آن‌ها، روش‌های ساخت، و کاربردهای متعدد این مواد مرور خواهند شد.

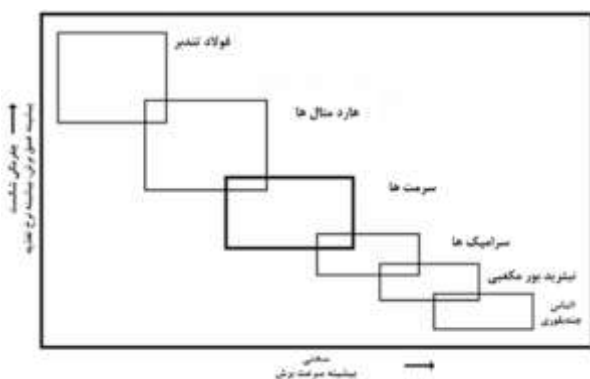
سرمت‌ها کامپوزیت‌هایی متشکل از یک زمینه سرامیکی اتصال یافته با یک بایندر فلزی هستند [۶]. به عبارت دیگر، سرمت ترکیبی از یک فاز سخت و شکننده (سرامیک) به همراه یک فاز انعطاف‌پذیر (فلز) به‌عنوان بایندر برای تشکیل یک ماده کامپوزیتی است [۷]. سرمت‌ها را می‌توان در دو گروه کلی دسته‌بندی نمود که شامل: هارد متال‌ها (معمولاً بر پایه کاربیدها) و سرمت‌های اکسیدی می‌باشند. دسته‌بندی کلی سرمت‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است [۸].



شکل (۱): دسته‌بندی سرمت‌ها [۸].

کاربیدهای سمانته و سرمت‌ها از جمله محصولات متالورژی پودر می‌باشند که دارای کاربردهای بسیار گسترده‌ای هستند.

پایه کبالت، نیکل، یا کبالت - نیکل شناخته می‌شود؛ بنابراین در صنعت مربوط به ابزار برش، نام سرمته‌ها از "هاردمتال‌ها" (اصطلاح انگلیسی) که به "کاربیدهای سمانته" (اصطلاح آمریکایی) نیز معروف هستند، متمایز می‌شود [۷]. لازم به ذکر است که ۶۵ درصد از کاربردهای سمانته در ابزارهای برش مورد استفاده قرار می‌گیرند. ۱۵ درصد از بازار کار این مواد متعلق به حوزه‌هایی مانند معدن‌کاری، حفاری چاه‌های نفت، و صنایع برش سنگ، و ۱۰ درصد از آن‌ها متعلق به صنایع ساخت و ساز و صنایع چوب می‌باشد [۱۴]. البته هر دو نوع مواد در فرآیندهای برش فلزات به کار می‌روند. سرمته‌ها از نظر عملکرد سرویس‌دهی همواره با کاربردهای سمانته مقایسه می‌شوند. به‌طور کلی سرمته‌ها نسبت به هاردمتال‌ها، تردتر بوده و انعطاف‌پذیری کمتری دارند و از نظر چقرمگی و سختی، بین سرامیک‌ها و هاردمتال‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۲). در جدول (۱) مزایا و معایب سرمته‌ها در مقایسه با هاردمتال‌ها آورده شده است [۷].



شکل (۲): مقایسه چقرمگی شکست و نرخ تغذیه در مقابل سختی و سرعت برش مواد متفاوت برای کاربرد در ابزارهای برش. سرمته‌ها در بین سرامیک‌های شکننده و هارد متال‌های انعطاف‌پذیر قرار دارند [۷].

دلیل آن را می‌توان به ترکیبی از خواص مانند سختی و چقرمگی برجسته آن‌ها در مقایسه با موادی نظیر الماس و یا فولادهای تندبر نسبت داد [۹].

اولین ثبت اختراع در زمینه کاربردهای سمانته در سال ۱۹۲۳ مربوط به یک شرکت آلمانی به نام Osram بوده که توانست مواد سخت را توسط فشردن و تف‌جوشی پودرها تولید نماید. در این اختراع، کاربرد تنگستن (WC) به همراه فلزاتی نظیر آهن، نیکل و کبالت در فاز مایع تف‌جوشی و در نتیجه بدنه‌هایی جامد و چگال تهیه شدند [۹].

حدود چهار سال پس از ساخت هارد متال‌ها در سال ۱۹۲۶ [۱۰]، کامپوزیت‌های پایه TiC تولید و با نام تجاری تیتانیت S به بازار عرضه شدند [۱۱]. بهترین ترکیب در این اختراع شامل ۶۲ درصد تیتانیا - ۲۷ درصد کاربرد مولیبدن - ۱۰ درصد نیکل - ۱ درصد کروم بوده است. در آن زمان به این مواد هارد متال‌های بدون تنگستن گفته می‌شد. حدود ۲۰ سال بعد کلمه سرمته وارد صنعت برش فلزات شد [۱۲].

کاربیدهای سمانته کامپوزیت‌هایی با خواصی عالی هستند که در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی و صنعتی مورد توجه فراوان قرار گرفته‌اند. این کامپوزیت‌ها خواصی ترکیبی از کاربردها و بایندهای فلزی، یعنی سختی و چقرمگی را به‌طور هم‌زمان دارا می‌باشند. معمولاً کاربردهای سمانته به سه نوع کلی شامل کاربردهای سمانته پایه WC با باینده کبالت، پایه WC در ترکیب با کاربرد تانتالیم و کاربرد نیوبیم و پایه TiC با باینده کبالت دسته‌بندی می‌شوند [۱۳]. در صنایع مربوط به برش فلزات، سرمته همیشه به‌عنوان یک کامپوزیت پایه TiC یا Ti(C,N) با ساختار FCC و باینده

جدول (۱): خواص سرمته‌ها در مقایسه با هارد متال‌ها [۷].

خواص	چقرمگی	سختی	چگالی مخصوص	هدایت حرارتی	زنجیره تولید	مشخصه یابی	عمق برش
هاردمتال	+	-	-	+	+	+	+
سرمته	-	+	+	-	-	-	-
خواص	سایش لبه ابزار	سایش سطح ابزار	اصطکاک، تعامل ابزار و قطعه	دقت ابعادی قطعات ساخته شده	ریسک تأمین مواد اولیه	نرخ تغذیه	سرعت برش
هاردمتال	+	-	-	-	-	+	-
سرمته	-	+	+	+	+	-	+

از دهه ۱۹۸۰ به بعد، افزایش قابل توجهی در عملکرد ابزارهای برش از طریق ایجاد پوشش‌هایی از نوع کاربید فلزات دیرگداز و آلومینا بر روی آن‌ها ایجاد شده است. با استفاده از فرآیندهای پوشش‌دهی نظیر رسوب شیمیایی بخار^{۱۲} یا رسوب فیزیکی بخار^{۱۳}، پوشش‌های سختی همچون TiC، TiN، Ti(C,N) بر روی سطوح کاربیدهای سمانته پوشش‌دهی شده‌اند [۱۵-۱۷]. در ۳۰ سال اخیر تولید کاربیدهای سمانته رشد قابل توجهی یافته‌اند؛ به نحوی که در سال ۱۹۹۳ مقدار تولید آن‌ها ۲۰ هزار تن و در سال ۲۰۰۸ مقدار آن‌ها ۶۰ هزار تن بوده است. این روند به شدت افزایشی بوده به نحوی که در کشوری مانند چین مقدار تولید کاربیدهای سمانته در سال ۲۰۱۷ برابر ۲۸ هزار تن بوده است [۱۸]. در شکل (۳) تعدادی از انواع قطعات هاردمتال پوشش‌دهی شده آورده شده است [۱۹].

سمانته مبتنی بر تیتانیوم در سال ۱۹۳۱ اختراع شد که متشکل از آلیاژ $(Ti, Mo)C_x$ و بایندر نیکل بوده است [۲۳]. در اواسط دهه ۱۹۵۰، شرکت فورد کاربید مولیبدن (Mo_2C) را به کاربید تیتانیوم (TiC) و نیکل افزود. بخشی از کاربید مولیبدن در نیکل حل و موجب سخت شدن فاز بایندر می‌شود. بخشی دیگر از آن با ذرات TiC واکنش داده و $(Ti, Mo)C$ را تشکیل داده که منجر به ترشوندگی بهتر با بایندر می‌شود [۲۴-۲۵]. در دهه ۱۹۷۰ برخی از محققین از TiN در کنار TiC استفاده نمودند که منجر به رشد دانه کم [۲۶]، خواص مکانیکی مناسب و مقاومت به فرسایش و اکسیداسیون آن گردید [۲۷]. نسبت TiN/TiC برابر ۰/۴ تا ۰/۵ منجر به بیشترین طول عمر در ابزارهای ساخته شده از این ترکیب شده است [۲۸]. سרمت‌های پایه $Ti(C,N)$ در دهه ۱۹۸۰ رشد قابل توجهی پیدا کردند [۲۹]. از اجزاء دیگری نظیر Co ، VC ، NbC ، TaC و WC در ترکیب این سرمت‌ها استفاده می‌شود. NbC و TaC منجر به افزایش مقاومت به شوک حرارتی می‌شوند. درحالی‌که حل شدن WC منجر به سخت شدن فاز بایندر و بهبود ترشوندگی بین کاربیدهای تیتانیوم و کبالت گردید. VC و Cr_3C_2 نیز انحلال‌پذیری بالایی در بایندر داشته‌اند، اما به‌عنوان ممانعت‌کننده رشد دانه فاز سخت نیز عمل می‌نمایند [۳۰-۳۲]. در دهه ۱۹۹۰، نسل جدیدی از سرمت‌ها بر پایه $Ti(C,N)-WC-Co$ توسعه داده شدند [۳۳]. در این سرمت‌ها، نیکل به‌طور کامل جایگزین کبالت شد [۳۴]. اما این ماده دارای مقاومت به تغییر فرم پلاستیک کمی بوده که با افزودن کاربید تانتالیوم، مقاومت آن افزایش یافت [۳۵]. البته به دلیل قیمت بالای تانتالیوم، این ماده با کاربید نیوبیوم جایگزین شد [۳۶]. در شکل (۴) تصویری از ریزساختار یک سرمت با ترکیب $Ti(C,N)-WC-NbC-Co$ نشان داده شده است.

از دهه ۱۹۸۰ به بعد، افزایش قابل توجهی در عملکرد ابزارهای برش از طریق ایجاد پوشش‌هایی از نوع کاربید فلزات دیرگداز و آلومینا بر روی آن‌ها ایجاد شده است. با استفاده از فرآیندهای پوشش‌دهی نظیر رسوب شیمیایی بخار^{۱۲} یا رسوب فیزیکی بخار^{۱۳}، پوشش‌های سختی همچون TiC، TiN، Ti(C,N) بر روی سطوح کاربیدهای سمانته پوشش‌دهی شده‌اند [۱۵-۱۷]. در ۳۰ سال اخیر تولید کاربیدهای سمانته رشد قابل توجهی یافته‌اند؛ به نحوی که در سال ۱۹۹۳ مقدار تولید آن‌ها ۲۰ هزار تن و در سال ۲۰۰۸ مقدار آن‌ها ۶۰ هزار تن بوده است. این روند به شدت افزایشی بوده به نحوی که در کشوری مانند چین مقدار تولید کاربیدهای سمانته در سال ۲۰۱۷ برابر ۲۸ هزار تن بوده است [۱۸]. در شکل (۳) تعدادی از انواع قطعات هاردمتال پوشش‌دهی شده آورده شده است [۱۹].



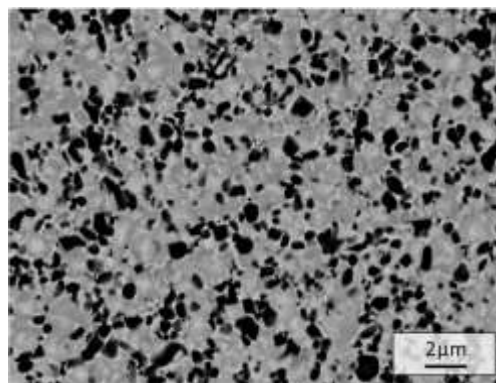
شکل (۳): برخی از قطعات هاردمتال که پوشش‌دهی نیز شده‌اند [۱۹].

اصلی‌ترین و مهم‌ترین فاز سخت در سرمت‌ها شامل کاربید مکعبی پایه تیتانیوم، نیتريد تیتانیوم و کربونیتريد تیتانیوم می‌باشد. این فاز معمولاً دارای ساختار هسته - حلقه است. در این ساختارها، حلقه توسط مکانیزم انحلال - رسوب ایجاد می‌شود [۲۰] که یک محلول جامد با ترکیب (Me) مولیبدن / تنگستن / تانتالیوم / نیوبیوم $(Ti, Me)(C,N)$ بوده و ساختاری مشابه با هسته دارد [۲۱]. البته حلقه می‌تواند به دو بخش دیگر شامل بخش داخلی و بخش خارجی تقسیم‌بندی شود. در سرمت‌ها هیچگونه فاز WC در ریزساختار وجود ندارد، اما تنگستن می‌تواند بخشی از ساختار هسته - حلقه را تشکیل دهد [۲۲]. اولین کاربید

ضعیف آن‌ها، به‌ویژه در دماهای پائین، است. این مواد هدایت حرارتی کم و ضریب انبساط حرارتی بالایی در مقایسه با کاربیدهای سمانته دارند. این خواص باعث خواهند شد که سرمت‌ها به ترک‌های ترمومکانیکی حساس باشند [۴۰-۴۲]. سرمت‌های پایه $Ti(C,N)$ نانوساختار دارای مقاومت به اکسیداسیون و سایش بهتری در مقایسه با سرمت‌های دانه‌درشت می‌باشند. البته این نوع از سرمت‌ها هنوز تجاری‌سازی نشده‌اند [۴۳].

۲- فرآوری و تهیه سرمت‌ها

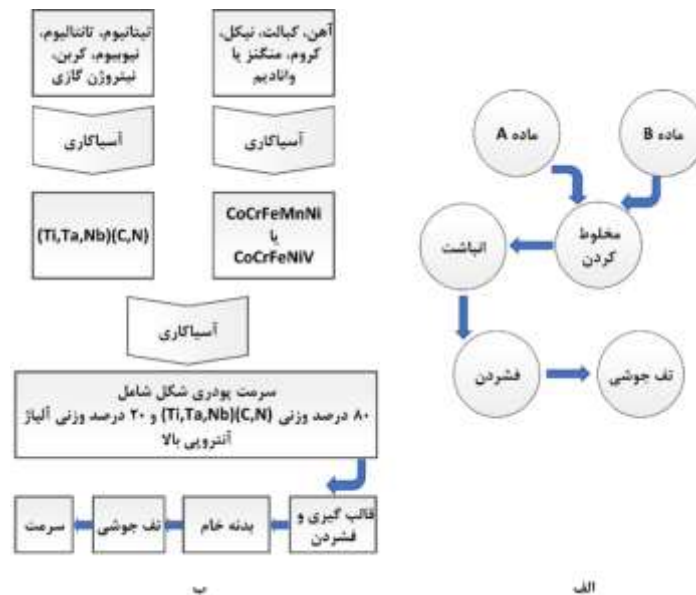
تهیه سرمت‌ها و کاربیدهای سمانته، از جمله موضوعات چالشی برای محققان بوده است. فرآیندهای سنتز و ساخت سرمت‌ها، نقش مستقیمی در تعیین خواص آن‌ها دارد. هر کدام از روش‌های سنتز و تهیه سرمت‌ها ممکن است دارای محدودیت‌هایی نیز باشد، اما محققان همواره در تلاش‌اند تا بهترین روش‌ها را برای ساخت انواع سرمت‌ها شناسایی کنند [۴۴]. تا به امروز، روش‌های زیادی برای سنتز سرمت‌ها معرفی شده‌اند که هر کدام دارای مزایا و معایبی بوده‌اند. روش‌های مرسوم و پیشرفته‌ای برای سنتز سرمت‌های کاربیدی وجود دارند که عمدتاً مبتنی بر روش متالورژی پودر می‌باشند. در شکل (۵) شماتیکی از دو روش سنتز مرسوم و پیشرفته و پارامترهای مؤثر بر آن‌ها نشان داده شده است [۴۵-۴۶].



شکل (۴): سرمت با ترکیب $Ti(C,N)-WC-NbC-Co$ هسته

سرمت متشکل از $Ti(C,N)$ حل‌نشده می‌باشد. حلقه داخلی متشکل از $(Ti,Nb,W)(C,N)$ غنی از تنگستن و قسمت بیرونی حلقه متشکل از $(Ti,Nb,W)(C,N)$ و بایندر کبالت است [۳۶].

اخیراً محققان بر تهیه سرمت‌های مبتنی بر $Ti(C,N)$ فوق‌ریزدانه تأکید دارند، چراکه این مواد دارای سختی، استحکام مکانیکی، چقرمگی و مقاومت به سایش بالایی می‌باشند. این مواد را می‌توان با استفاده از پودرهای نانومقیاس و روش‌های سریع تف‌جوشی تولید نمود [۳۱، ۳۷]. سرمت‌ها به دلیل پایداری شیمیایی بالا و سختی مناسب در دماهای بالا، عمدتاً برای ابزارهای برش، در مقایسه با کاربیدهای سمانته پایه WC ، استفاده می‌شوند. اگرچه که کاربیدهای سمانته پوشش‌دهی شده با رسوب فیزیکی بخار نیز می‌توانند در این حوزه‌های کاربردی استفاده شوند، اما سرمت‌های پایه $Ti(C,N)$ دارای دقت ابعادی بالاتری در حین کار می‌باشند [۳۸-۳۹]. عیب عمده سرمت‌ها، چقرمگی



شکل (۵): مراحل سنتز سربت‌ها: الف) روش مرسوم و ب) روش پیشرفته [۴۵-۴۶].

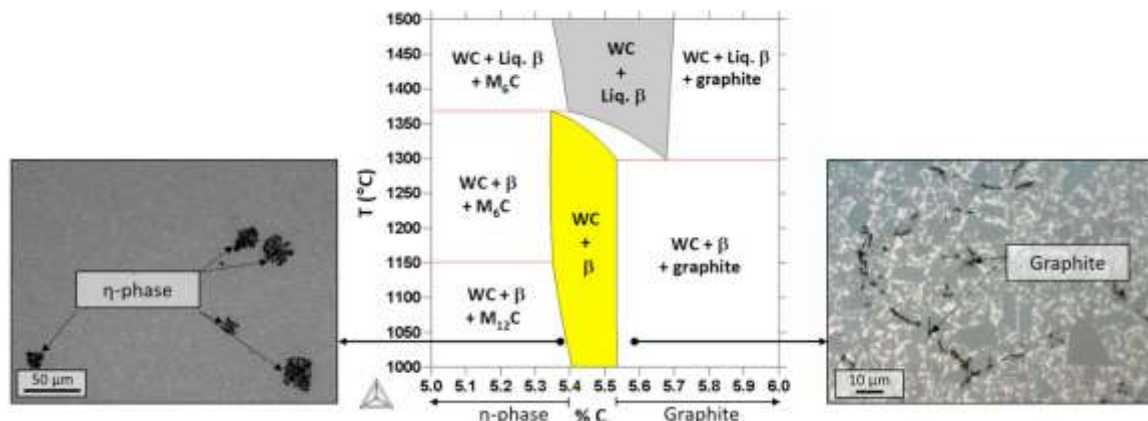
دما کاهش یافته و مواد حل شده در بایندر شروع به رسوب مجدد بر روی دانه‌های حل نشده می‌کنند. چگالش به دلیل بازآرایی ذرات افزایش می‌یابد که در نهایت انقباض بیشتری در قطعه صورت می‌گیرد. در مرحله سوم، قطعه به دمای ذوب فاز بایندر (مثلاً برای کاربردهای سمانته WC-Co، این دما تقریباً ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌رسد و تف‌جوشی فاز مایع شروع می‌شود [۵۰-۵۱]. در مرحله چهارم (سرمايش)، فاز بایندر انجماد می‌یابد. معمولاً تف‌جوشی در کوره‌های تف‌جوشی تحت کنترل دما، اتمسفر، فشار، و... انجام می‌شود. فرآورده‌های دیگری مانند تف‌جوشی ماکروویو، و تف‌جوشی جرقه پلازما^{۱۵} نیز توسعه یافته‌اند اما هنوز صنعتی نشده‌اند [۵۲].

به‌طور کلی، کاربردهای سمانته از طریق فرآیند تف‌جوشی در فاز مایع تهیه می‌شوند که اغلب منجر به رشد ناخواسته دانه‌های کاربردی (کاربردهای تنگستن)، حتی در حضور ممانعت‌کننده‌های رشد دانه نظیر VC و Cr_3C_2 خواهد شد [۵۳]. در کاربردهای سمانته WC-Co، اندازه دانه WC به‌طور جدی بر روی خواص مکانیکی قطعه نهایی تأثیرگذار می‌باشند [۵۴]. برخی از محققین این مشکل را با روش‌های شیمیایی برطرف نموده‌اند. برای مثال سنتز پودرهای نانوساختار در محلول‌های آبی با اندازه ذرات ۳۰ تا ۵۰

تولید محصولات کاربردهای سمانته یک فرآیند متالورژی پودر می‌باشد که متشکل از تولید پودر، مخلوط کردن و آسیا کاری، خشک‌کن پاششی برای ایجاد گرانوله‌های پودر، فشردن، اکستروژن یا قالب‌گیری اشکال نهایی، واکسزدایی و پیش‌پخت، تف‌جوشی (تف‌جوشی فاز مایع، تف‌جوشی - فشردن ایزواستاتیک داغ^{۱۴}، تف‌جوشی گرادیانی)، عملیات بعد از تف‌جوشی (ماشین‌کاری) و در نهایت عملیات اتمام‌کاری می‌باشد. برای اختلاط فیزیکی معمولاً روش آسیا کاری گلوله‌ای به کار گرفته می‌شود که اغلب از یک افزودنی نیز جهت جلوگیری از کلوخه شدن پودرها استفاده می‌شود [۴۷]. به‌منظور دستیابی به خواص مکانیکی و ریزساختار مطلوب، بایستی تف‌جوشی کاربردهای سمانته با دقت بالایی انجام گیرد. کاربردهای سمانته معمولاً با تف‌جوشی در فاز مایع تهیه می‌شوند. در تف‌جوشی آنها معمولاً ۴ مرحله اصلی اتفاق می‌افتد [۴۸-۴۹]. در مرحله اول احیاء اکسیدها و خروج گازهای بایندر و ناخالصی‌ها اتفاق می‌افتد و بنابراین با انقباض اولیه در قطعه همراه است. در مرحله دوم با افزایش دما، تف‌جوشی در فاز جامد شروع می‌شود. فاز بایندر شروع به تر نمودن دانه‌های فاز سخت مانند کاربردهای (کاربردهای تنگستن) نموده و انحلال و انتقال جرم توسط نفوذ حالت جامد انجام می‌گیرد. تداخل‌ها با افزایش

این فاز منجر به کاهش چقرمگی کاربیدهای سمانته، به‌ویژه هنگامی که به صورت دندریت‌های بزرگ رسوب نمایند، خواهد شد. البته در صورتی که کاربیدهای سمانته دارای کربن بالایی باشند، کربن اضافی به صورت گرافیت رسوب خواهد کرد که منجر به کاهش خواص مکانیکی آنها خواهد شد. شکل (۶) دیاگرام فازی کاربید سمانته با ترکیب WC-10wt%Co را نشان می‌دهد. در سمت چپ و راست آن، تصاویری از ریزساختارهای کاربید سمانته به همراه مناطقی از فازهای اتا و گرافیت مشاهده می‌شود. در این شکل، β فاز بایندر می‌باشد و منطقه زردرنگ یک منطقه دوفازی کاربید سمانته و بایندر عاری از سایر فازها می‌باشد. لازم به ذکر است که حلالیت تنگستن در مذاب کبالت، با افزایش فعالیت کربن، کاهش می‌یابد. اگر مقدار کربن در کاربید سمانته کمتر از حالت ایده‌آل (نسبت غلظت کربن به غلظت تنگستن = ۱) باشد، مقدار تنگستن حل شده در کبالت نیز افزایش می‌یابد. معمولاً مقدار کربن بایستی در فرآیند ساخت به صورت کنترل شده و در حدود ۰/۰۵ درصد وزنی باشد [۵۲].

نانومتر از جمله این روش‌هاست [۵۵-۵۶]. تف‌جوشی کاربیدهای سمانته مستلزم دماهای بالایی بوده و بنابراین روش‌های نوینی برای کاهش اندازه دانه و کاهش دماهای تف‌جوشی برای دستیابی به مواد کاملاً چگال توسعه یافته‌اند [۵۷-۵۸]. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از: تف‌جوشی مقاومتی الکتریکی^{۱۶}، تف‌جوشی جرقه پلاسما، فشردن ایزواستاتیک داغ، تف‌جوشی حرارتی القایی بسامد بالا^{۱۷}، تف‌جوشی پالسی پلاسما^{۱۸}، و چگالش داغ در فشارهای بسیار بالا و سریع^{۱۹} [۵۹]. با استفاده از روش‌های معمولی (بدون فشار) تف‌جوشی، نمی‌توان کنترل مناسبی بر روی رشد دانه داشت؛ اما امروزه با جایگزین کردن روش‌های جدید مذکور، می‌توان رشد دانه را کنترل نمود [۶۰]. مزیت دیگر روش‌های تف‌جوشی تحت فشار مانند جرقه پلاسما نسبت به روش‌های معمولی، امکان اعمال فشار خارجی به ماده در حین تف‌جوشی می‌باشد که منجر به دستیابی به موادی بدون تخلخل و یا تخلخل بسیار پایین خواهد شد [۶۱]. در فرآیند تهیه کاربیدهای سمانته بایستی مقدار کربن نیز کنترل شود. در مقادیر پائین کربن، فاز کاربیدی غیراستوکیومتری با نام فاز اتا^{۲۰} تشکیل می‌شود.



شکل (۶): تصاویر میکروسکوپ نوری از فازهای اتا و گرافیت در کاربید سمانته WC-10%Co [۵۲].

به این موضوع، برای ساخت قطعات با اشکال هندسی پیچیده به روش متالورژی پودر، نیاز به ماشین‌کاری پس از تف‌جوشی می‌باشد که مستلزم هزینه‌ها و تجهیزات زیاد خواهد بود؛ بنابراین امروزه محققان، روش‌های دیگری نیز

یکی از معایب روش متالورژی پودر در تهیه سרمت‌ها، محدودیت تولید قطعات با اشکال پیچیده می‌باشد. گاهی اوقات، پس از تولید قطعات به روش متالورژی پودر، ممکن است نیاز به شکل‌دهی آن‌ها داشته باشیم که با توجه به سختی بالای مواد سרمت، این امر دشوار خواهد بود [۴۴]. با توجه

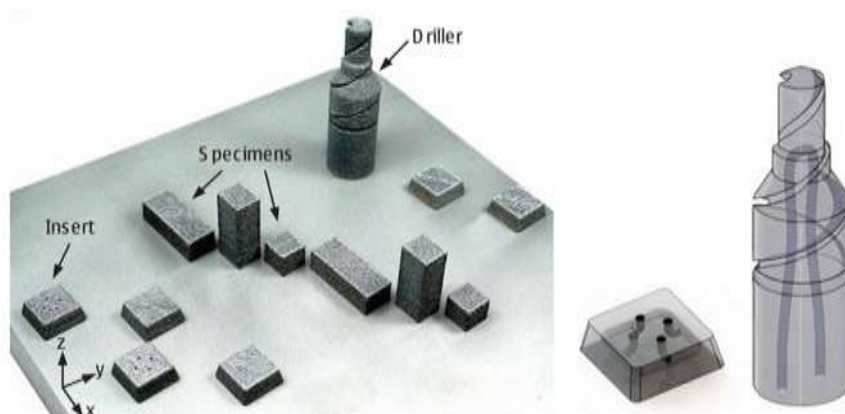
مانند ساخت افزایشی را معرفی کرده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد [۶۲-۶۳].

۲-۱- ساخت افزایشی سرمته‌ها

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، روش‌های مرسوم و قدیمی ساخت سرمته‌ها، محدودیت‌هایی به همراه دارند و بنابراین برای ساخت سرمته‌های با اشکال هندسی پیچیده می‌توان از روش‌های ساخت افزایشی^{۲۱} استفاده نمود. در این روش‌ها، مواد به صورت سه‌بعدی اسکن شده (پرینت سه‌بعدی) و اغلب به صورت لایه‌لایه تولید می‌شوند [۶۴]. فرآیندهای ساخت افزایشی، به روش‌های مبتنی بر پودر، روش‌های مبتنی بر مایع (مذاب) و روش‌های مبتنی بر جامد تقسیم‌بندی می‌شوند که برای ساخت سرمته‌ها، اغلب از روش‌های مبتنی بر پودر استفاده می‌شود [۶۵]. دو روش ذوب لیزری انتخابی^{۲۲} و تف‌جوشی لیزری انتخابی^{۲۳} از جمله روش‌های ساخت افزایشی سرمته‌ها می‌باشند. روش ذوب لیزری انتخابی از جمله فرآیندهای مهم در ساخت افزایشی مواد مختلف و سرمته‌ها می‌باشد که بر پایه متالورژی پودر و فناوری لیزر عمل می‌کند [۶۶]. طی این فرآیند، پودر ماده بر روی یک بستر ریخته می‌شود و سپس یک پرتو لیزری پُر توان، بر روی نقاط مشخص شده از پودر تابانده می‌شود. حرارت ایجاد شده در پودر منجر به ذوب آن شده و در

نهایت حوضچه مذاب به سرعت منجمد می‌شود [۶۷]. در این روش ساخت ماده به صورت لایه به لایه انجام می‌شود [۶۸]. شکل (۷) برخی از محصولات تولید شده به روش ذوب لیزری انتخابی از جنس WC-Co را نشان می‌دهد [۶۹]. عوامل مختلفی نظیر مرفولوژی پودر، خلوص، اندازه ذرات، ترکیب شیمیایی و توزیع یکنواخت از جمله پارامترهای تأثیرگذار در خواص مواد تولید شده به این روش هستند [۷۰]. البته در بسیاری از سرمته‌های تولید شده با این روش، وجود ترک نیز گزارش شده است. خمیروف و همکارانش^{۲۴} [۶۸]، سرمته‌های پایه WC-Co با ترکیبات مختلف را به روش ذوب لیزری انتخابی تهیه نمودند. آن‌ها در این سرمته‌ها هیچگونه ترکی مشخصه نکردند. عدم وجود ترک نشان می‌دهد که ترکیب انتخابی ۲۵ درصد وزنی WC و ۷۵ درصد وزنی Co در برابر شوک‌های حرارتی لیزر، مقاوم بوده است.

روش تف‌جوشی لیزری انتخابی نیز مشابه با روش ذوب لیزری انتخابی عمل می‌کند، با این تفاوت که در روش تف‌جوشی لیزری انتخابی، پودرها تا دماهای پایین‌تر از نقطه ذوب آن‌ها حرارت‌دهی می‌شوند و ذوب کامل صورت نمی‌گیرد. احتمال وجود تخلخل‌های زیاد در ساختار قطعات تولیدی با این روش از جمله مشکلات اصلی در این روش‌ها می‌باشد [۷۱].

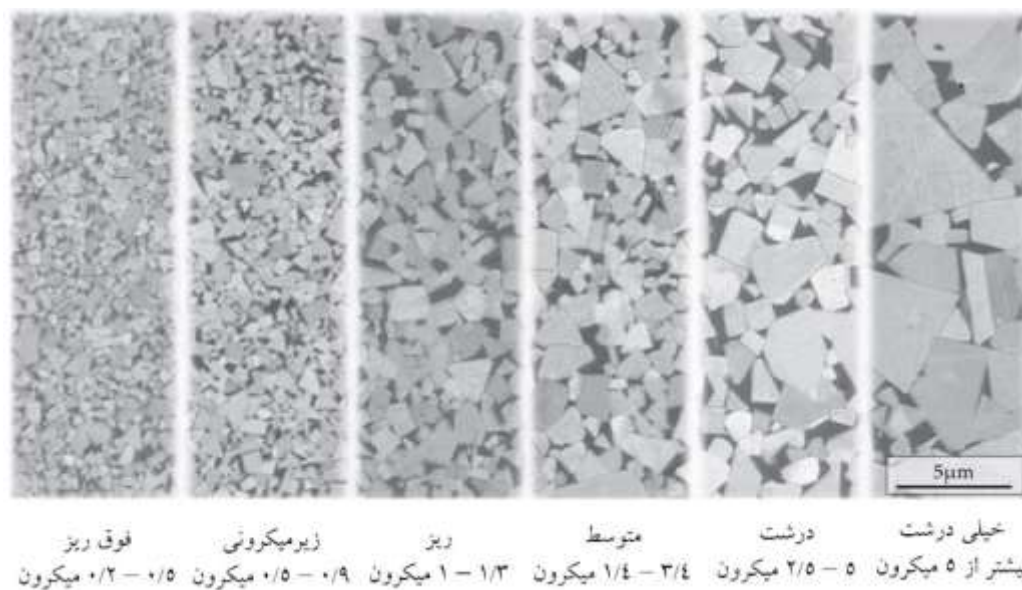


شکل (۷): تصویر برخی از قطعات تولید شده به روش ذوب لیزری انتخابی از جنس WC-Co [۶۹].

۳- کاربرد تنگستن و مرفولوژی آن

فرم پلاستیک نیز به کامپوزیت اعطا می‌کند. ترکیب این دو خاصیت به همراه ترشوندگی عالی کبالت با WC از عوامل مهم و تعیین کننده در خواص WC-Co می‌باشند. به عبارت دیگر، ریزساختار WC و درصد فاز بایندر در این کاربردها، از اصلی ترین معیارهای تعیین خواص هستند. در شکل (۸) اندازه دانه‌های مختلف WC نشان داده شده است [۷۴].

کاربردهای سمانته WC، از محبوب ترین و فراگیرترین مواد معرفی شده در حوزه مواد مقاوم به سایش هستند که از اهمیت بالایی برخوردارند [۷۲]. در کاربردهای سمانته، کاربید تنگستن هگزآگنال فاز غالب را تشکیل می‌دهد [۷۳]. بیشتر از ۸۰ درصد کاربردهای سمانته حاوی کاربید تنگستن می‌باشند [۷۴]. در کاربردهای سمانته تف‌جوشی شده، فاز کاربید تنگستن علاوه بر ایجاد سختی بالا، تغییر

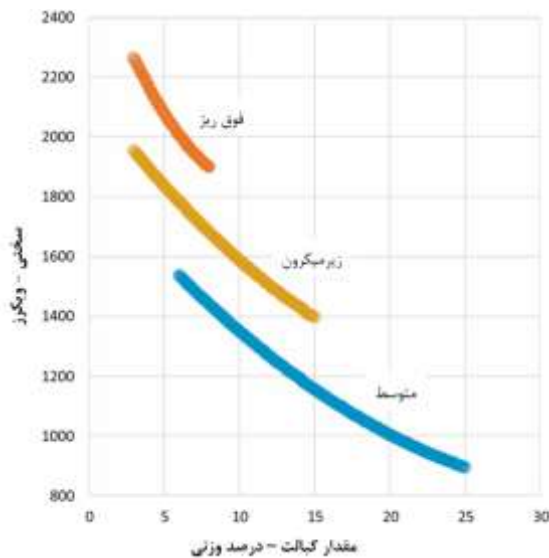


شکل (۸): ریزساختارهای کاربید سمانته WC-Co با اندازه دانه‌های مختلف WC [۹].

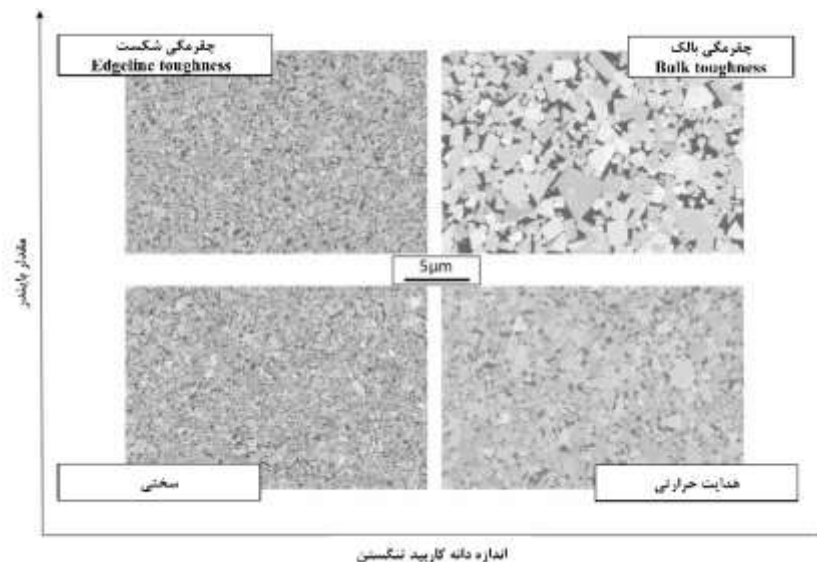
برای قالب‌های کشش سیم و قطعات مقاوم به سایش و ابزار برش مورد استفاده قرار گرفت [۷۶]. در سال‌های اولیه ساخت این محصول، محققین دریافتند که با افزودن کاربردهای دیگر نظیر کاربید تیتانیوم (TiC) به آن، می‌توان خواص مرتبط با ماشین کاری را بهبود داد [۷۷-۷۹]. در کاربردهای سمانته WC-Co، ریزدانه شدن WC و کاهش میزان کبالت، نقش اساسی در افزایش سختی آن دارد. برای مثال، همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، کاربردهای سمانته ریزدانه با درصد کبالت پایین، سختی بالاتری از خود نشان داده‌اند. خلاصه اینکه، اکثر خواص کاربردهای سمانته WC-Co را می‌توان با مقدار کبالت و / یا اندازه دانه میانگین کاربید تنگستن مرتبط دانست [۷۲]. با تنظیم مقدار بایندر و اندازه دانه کاربید تنگستن، می‌توان به

۳-۱-۳- کاربردهای سمانته WC-Co

فازهای کاربیدی و بایندر دو جزء اصلی تشکیل دهنده کاربردهای سمانته WC-Co می‌باشند. دو فاز در این کاربید وجود دارند: (۱) کاربید تنگستن به نام فاز آلفا، (۲) بایندر کبالت به نام فاز بتا. مضاف بر این فازها، جزء سومی در این کاربردها ممکن است وجود داشته باشد که معمولاً کاربردهای مکعبی و کربونیتريدها بوده که منجر به ایجاد خواص جدید در کاربردهای سمانته خواهند شد. این کاربردها در واقع ممانعت کننده‌های رشد دانه کاربید تنگستن هستند. این فازها را با نام فاز گاما می‌شناسند که در ادامه بررسی خواهند شد [۷۵]. سیستم WC-Co برای اولین بار در سال ۱۹۲۷ در آلمان تحت نام تجاری "WIDIA" (به زبان آلمانی Wie DIAMant یعنی مشابه الماس) معرفی و



شکل (۹): سختی کاربیدهای سمانته تابعی از اندازه دانه‌های WC و مقدار کبالت [۷۲].



شکل (۱۰): ارتباط بین مقدار بایندر و اندازه دانه کاربید تنگستن با برخی از خواص مهم در کاربیدهای سمانته [۷۲].

خواص مکانیکی (چقرمگی، سختی، و هدایت حرارتی) بهینه‌ای دست یافت (شکل (۱۰)). محتوای کبالت در کاربید سمانته WC-Co، می‌تواند از ۴ تا ۳۰ درصد وزنی متغیر باشد. این نکته را باید در نظر گرفت که با افزایش میزان کاربید، مقاومت به سایش بهتری حاصل می‌شود. اما از سوی دیگر مقدار چقرمگی ماده کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند بسیار مضر باشد [۸۰].

شده و بنابراین با کاهش انرژی فصل مشترک به عنوان یک سد، از رشد دانه‌های WC جلوگیری می‌کند. البته تردی ناشی از رسوبات (V,W)C مکعبی در مرز دانه‌های کاربید تنگستن نیز بایستی مدنظر قرار گیرد [۸۲-۸۳]. روش‌های مرسوم تف جوشی برای تهیه کاربیدهای سمانته با میانگین اندازه دانه‌های کاربید تنگستن کمتر از ۰/۲ میکرون، با مشکلاتی همراه می‌باشند و بنابراین با استفاده از مواد اولیه ریزدانه‌تر و همچنین روش‌های تف جوشی دیگر، می‌توان این موضوع را مدیریت کرد. استفاده از روش‌های

همان‌طور که عنوان شد، خواص مکانیکی کاربیدهای سمانته WC-Co وابستگی شدیدی به اندازه دانه‌های WC دارد. با کاهش اندازه دانه‌های آن، سختی و استحکام فشاری کاربید سمانته نیز افزایش می‌یابد [۸۱]. امروزه از بازدارنده‌های رشد دانه نظیر وانادیم، تیتانیوم، کروم، تانتالیوم، مولیبدن، و نیوبیوم برای کنترل اندازه دانه‌های کاربید تنگستن استفاده می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است که این بازدارنده‌ها منجر به تشکیل یک لایه مکعبی با ترکیب (M,W)C (M شامل کروم، وانادیم، تیتانیوم، و...) بر روی سطح دانه‌های WC

می‌باشد که منجر به افزایش مقاومت به ساییش WC-Co می‌شود [۴۳]. به دلیل بالا بودن مقدار سختی کاربید تیتانیوم در مقایسه با کاربید تنگستن، افزودن این کاربید باعث افزایش سختی آن خواهد شد. همچنین کاربید تانتالیوم، کاربید نیوبیوم، و کاربید زیرکونیوم منجر به بهبود مقاومت به تغییر فرم پلاستیک و افزایش مقاومت به اکسیداسیون در دماهای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد خواهد شد [۸۹]. به‌ویژه کاربید تانتالیوم که دارای مقاومت به ساییش و سختی بالاتری در دماهای بالا نیز می‌باشد. راهکارهای جایگزین کردن بخشی از کاربید تنگستن با کاربیدهای مخلوط مانند $(Ta, Nb)C + TiC$ نیز از جمله موضوعاتی است که مورد بررسی قرار گرفته است. البته به دلیل توسعه استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند رسوب شیمیایی بخار و رسوب فیزیکی بخار، امروزه استفاده از کاربیدهای مخلوط، محدودتر شده و به جای آن از فناوری‌ها مذکور برای پوشش‌دهی کاربردهای سمانته استفاده می‌شود [۸۹].

۴-۲- کاربردهای سمانته WC-Co با فاز اتا (η)

کاربیدهای سمانته دی‌کربوره شده در ریزساختارشان حاوی فاز اتا (η) می‌باشند که از آن‌ها به‌عنوان کاربردهای سمانته گراپانی استفاده می‌شود. فاز اتا (η) یک کاربید سه‌گانه از تنگستن، کبالت و کربن است که هنگام کمبود کربن در سیستم WC-Co تشکیل می‌شود. این فاز دارای دو شکل مختلف کاربیدی با نام‌های M_6C و $M_{12}C$ است. ترکیب شیمیایی کاربید M_6C (که در آن M شامل کبالت و تنگستن است) از $Co_{0.2}W_{2.8}C$ تا Co_2W_4C متغیر بوده و این فاز در دماهای پائین پایدار می‌باشد [۹۰]، درحالی‌که $M_{12}C$ دارای ترکیب شیمیایی ثابت Co_6W_6C بوده و در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار می‌باشد [۹۱]. هر دوی این فازها دارای ساختار مکعبی بوده اما M_6C می‌تواند توسط یک واکنش آهسته و درجا به صورت $M_6C \rightarrow binder + M_{12}C + WC$ تجزیه شود. مقدار کمبود کربن و نرخ سرمایش بر روی مقدار و شکل فاز اتا در آلیاژ تأثیرگذار است [۹۲].

۴-۳- کاربردهای سمانته مستحکم شده با ذرات

تف‌جوشی مبتنی بر جریان‌های پالسی و تف‌جوشی‌های تحت فشار از جمله راهکارهای کنترل اندازه دانه در این کاربردها می‌باشند [۸۴]. اخیراً روش آلاییدن (دوپ کردن) [۲۵] ساختار هگزآگونال WC نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با دوپ کردن فلزات انتقالی گروه ۴، ۵ و ۷ در ساختار کاربید تنگستن می‌توان پودرهایی با ترکیب $(W, Me)C$ سنتز نمود. هدف از این روش، اصلاح خواص ذاتی کاربید تنگستن هگزآگونال و همچنین کنترل رشد دانه‌های کاربید تنگستن از طریق دوپ کردن می‌باشد. برای مثال استفاده از تانتالیوم به‌عنوان دوپنت در ساخت کاربید سمانته WC-Co مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که مدول یانگ بلورهای دوپ شده نسبت به WC دوپ نشده کمتر بوده است. چالش اصلی هنگام دوپ کردن WC از منظر فرآیندی، کنترل رسوبات کاربیدهای مکعبی یا کربونیت‌ریدها در WC هگزآگونال دوپ شده می‌باشد زیرا این رسوبات بر روی چقرمگی محصولات تف‌جوشی شده تأثیر گذارند [۸۵-۸۶].

۴-۱- کاربردهای مکعبی و کاربردهای افزودنی

۴-۱-۱- کاربردهای سمانته WC-Co با فاز گاما (γ)

افزودن برخی از کاربیدها مانند TiC ، TaC ، NbC و در برخی موارد V_4C ، ZrC یا HfC به کاربردهای سمانته WC-Co منجر به تشکیل فازهای کاربیدی ثانویه مکعبی یا فاز گاما $(M, W)C$ خواهند شد (بسته به نوع کاربید افزوده شده: M شامل تیتانیوم، تانتالیوم، نیوبیوم، زیرکونیوم، هافیم، وانادیم) [۸۷]. فاز ثانویه در کاربردهای مختلف می‌تواند مفید واقع شود، اما در صورتی که میزان آن کنترل نشود، مضر بوده و منجر به افزایش شکنندگی کاربید سمانته نیز خواهد شد [۸۸]. فاز گاما معمولاً در تصاویر میکروسکوپ نوری به صورت قهوه‌ای‌رنگ و کروی شکل دیده می‌شود [۸۹]. حلالیت این کاربیدها در فاز مایع، هنگام تف‌جوشی در فاز مایع، محدود می‌باشد و بنابراین ممکن است انحلال ناقص ذرات کاربید افزوده شده مشاهده شود. بنابراین مقدار مجاز استفاده از این کاربیدها بسیار محدود می‌باشد. کاربید تیتانیوم (TiC) یکی از کاربردهای بسیار سخت و پایدار

استحکام‌دهی زمینه کاربیدهای سمانته با افزودن دیگر فازهای سخت (مانند اکسیدها، سیلیسیدها، بوریدها به شکل ویسکر و یا ذرات توزیع شده) یکی دیگر از روش‌های مدیریت خواص در کاربیدهای سمانته است. استفاده از ذرات در زمینه، برخلاف فاز گاما، منجر به تشکیل اسکله کاربید سمانته نخواهد شد. اگرچه که این روش هنوز به صورت گسترده در صنایع به کار گرفته نشده است، اما خواص مهم این فرآیند بررسی شده است. تاکنون کاربیدهای سمانته WC-Ni مستحکم شده با نانو ویسکرهای SiC مورد بررسی قرار گرفته‌اند. چگالش کاربیدهای سمانته مستحکم شده با ذرات، به کسر حجمی ذرات افزوده شده وابسته است. نمونه‌های حاوی مقادیر کم از نانو ویسکرهای کاربید سیلیسیوم دارای چگالی بالایی بوده اما با افزایش مقدار آن‌ها، کلوخه شدن و غیریکنواختی توزیع آن‌ها منجر به کاهش خواص کاربیدهای سمانته می‌شود. افزودن ذرات نیتريد بور مکعبی (cBN) نیز منجر به بهبود خواص کاربیدهای سمانته پایه نیکل شده‌اند. برای مثال افزودن ذرات نیتريد بور مکعبی از صفر تا ۵۰ درصد حجمی در ترکیب کاربید سمانته 8wt%Ni-0.7/0.3wt%VC/TaC منجر به افزایش سختی آن از ۲۱۰۰ ویکرز به ۳۲۰۰ ویکرز و کاهش استحکام خمشی از ۱۹۵۰ به ۱۲۵۰ مگاپاسکال شده است. سרمت‌های پایه TiC مستحکم شده با ویسکرهای TiC در مقایسه با ویسکرهای SiC دارای مرفولوژی بهتر در فصل مشترک و همچنین استحکام پیوندی بهتر بوده‌اند [۹۳].

۴-۴-۴ سרمت‌های پایه NbC

سرمت‌های پایه کاربید نیوبوم (NbC) برای اولین بار در سال ۲۰۱۳ به عنوان مواد مقاوم به سایش گزارش شدند [۹۴]. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی جایگزینی WC با کاربیدهای دیگری مانند NbC انجام شده است. کاربید نیوبوم را می‌توان از طریق کربوترمال اکسید نیوبوم (Nb_2O_5) تهیه نمود [۹۵]. مضاف بر این، نیوبوم را می‌توان در استوکیومتری‌های مختلف به کاربید نیوبوم مکعبی و همچنین کاربید نیوبوم هگزاگونال (Nb₂C) تبدیل نمود [۹۶]. همانند کاربیدهای سمانته پایه WC، سרمت‌های پایه

NbC را نیز می‌توان با فلزات مشابه و با فرآیندهای مشابه تف جوشی نمود. همچنین کاربیدهای نیوبوم و اکسید نیوبوم هیچگونه خطری برای سلامتی انسان به همراه ندارند [۹۷]. تاکنون سרمت‌های NbC-Co و NbC-Co-B مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است که با افزایش بور، مرفولوژی دانه‌های NbC از حالت هموار با لبه‌های گرد به حالت کروی درمی‌آیند [۹۸]. همچنین سرمت‌های NbC-Co در مقایسه با NbC-Ni دارای چقرمگی شکست کمتر و ترشوندگی بسیار ضعیف‌تر بوده‌اند. افزودن ممانعت‌کننده‌های رشد دانه نظیر آلومینیوم به آلیاژهای NbC-Fe و یا NbC-Ni و همچنین افزودن Mo₂C و یا VC به سرمت‌های NbC-Ni منجر به محدود کردن رشد دانه در آن‌ها شده است. کاربید نیوبوم دمای ذوب بالایی دارد و بنابراین محدودیت نرم شوندگی و تمایل به سایش چسبنده در آن محدود می‌شود. ضریب انبساط حرارتی بالاتر و مدول الاستیک پایین‌تر کاربید نیوبوم منجر به تنش‌های حرارتی کوچک‌تر بین کاربید و بایندر فلزی نسبت به کاربید تنگستن خواهد شد. اگرچه که سختی کاربید نیوبوم کمتر از کاربید تنگستن است، اما مدول الاستیک و سختی آن با افزایش دما تقریباً ثابت باقی می‌ماند. از این کاربید در کنار آهن نیز می‌توان استفاده نمود چرا که حلالیت آن در آهن پایین است. برخی از تحقیقات گزارش نموده‌اند که سرمت‌های پایه NbC را می‌توان به عنوان ابزار برش استفاده نمود؛ اما خواص مکانیکی آن‌ها همچنان نسبت به کاربیدهای سمانته پایه WC پایین‌تر است [۹۹].

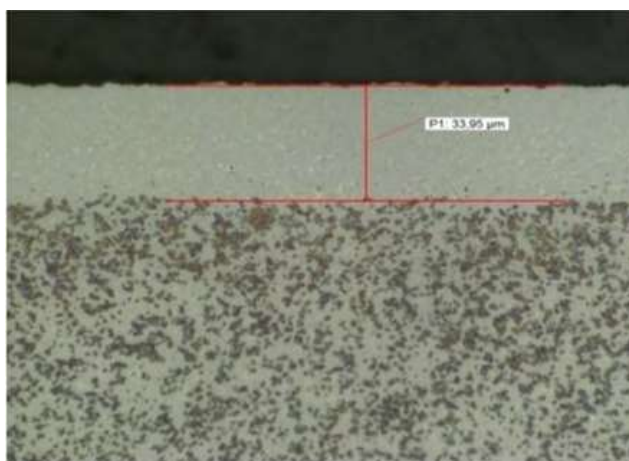
۵- کاربیدهای سمانته گرادانی

۵-۱-۱ کاربیدهای سمانته گرادانی عاری از گاما

کاربیدهای سمانته گرادانی، کاربیدهایی با خواص متفاوت در نواحی مختلف خود هستند. برای مثال می‌توان یک کاربید سمانته را طوری طراحی نمود که بخش‌های مختلف آن دارای خواص متفاوتی باشند. یک بدنه تف جوشی شده از کاربید سمانته گرادانی می‌تواند هم‌زمان دارای خواص سختی بالا در یک ناحیه و چقرمگی بالا در ناحیه دیگر خود باشد [۱۰۰]. پرکاربردترین کاربیدهای سمانته گرادانی،

کاربیده‌های عاری از فاز کاربید ثانویه مکعبی یا فاز گاما هستند [۱۰۱]. همان‌طور که ذکر شد، فاز گاما می‌تواند منجر به افزایش مقاومت به سایش و افزایش سختی کاربید سمانته شود [۱۰۲]، اما از سوی دیگر ممکن است شکنندگی ماده را نیز افزایش دهد [۱۰۳]. کاربیده‌های سمانته را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که سطح آن تا ضخامت حدود ۳۰ میکرومتر، عاری از فاز گاما و بخش عمده آن حاوی فاز

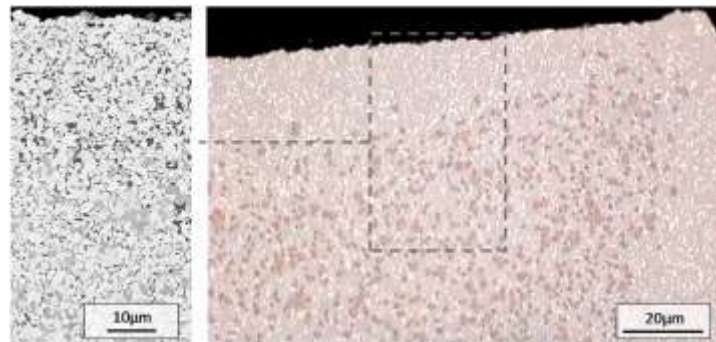
گاما باشد (شکل (۱۱)) [۱۰۴]. کاربیده‌های گرا‌دیانی بسیار مرسوم که مواد گرا‌دیانی عاری از فاز گاما (ضخامتی در حدود چند میکرومتر) نیز نامیده می‌شوند در صنعت برش فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰۱]. همچنین کاربیده‌های گرا‌دیانی با سطوحی (حدود صد میکرومتر) عاری از کبالت نیز برای برش سنگ‌ها استفاده می‌شوند.



شکل (۱۱): ریزساختار کاربید سمانته گرا‌دیانی تهیه شده از پودر W-Ti-C-N-Co (تف‌جوشی شده در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) با سطح عاری از فاز گاما. ضخامت لایه گرا‌دیانی سطحی حدود ۳۴ میکرون است [۱۰۴].

یکی از کاربیده‌های سمانته گرا‌دیانی که بسیار در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاربید گرا‌دیانی عاری از فاز گاما است. نبود فاز گاما در مناطقی از سطح این کاربید (با ضخامت ۱۰ تا ۳۰ میکرون) منجر به افزایش چقرمگی آن نواحی خواهد شد. در کاربیده‌های سمانته پوشش‌دهی شده با فناوری رسوب شیمیایی بخار، لازم است تا از شوک‌های حرارتی در حین سرمایش نیز جلوگیری شود. در عین حال بایستی خواص مکانیکی عمق نمونه نیز برقرار باشد. چنین ریزساختارهایی در کاربیده‌های سمانته پایدار شده وجود دارند که به‌عنوان اینسرت‌های (مته، براده‌بردار) ^{۲۶} برش برای

تراشکاری فولادها مورد استفاده قرار می‌گیرند. تشکیل کاربیده‌های گرا‌دیانی عاری از فاز گاما یک فرآیند کنترل شونده با نفوذ از نوع دی‌نیتراسیون است که معمولاً توسط فاز حاوی نیتروژن انجام می‌شود. این فرآیند منجر به نفوذ تیتانیوم به داخل و افزایش مقدار کبالت در سطح خواهد شد. علاوه بر این، فرآیند نفوذ منجر به تشکیل مخروطی غنی از فاز گاما در لبه‌های ابزار برش (اینسرت) و افزایش مقاومت به سایش آن‌ها خواهد شد (شکل (۱۲)) [۱۰۵-۱۰۶].



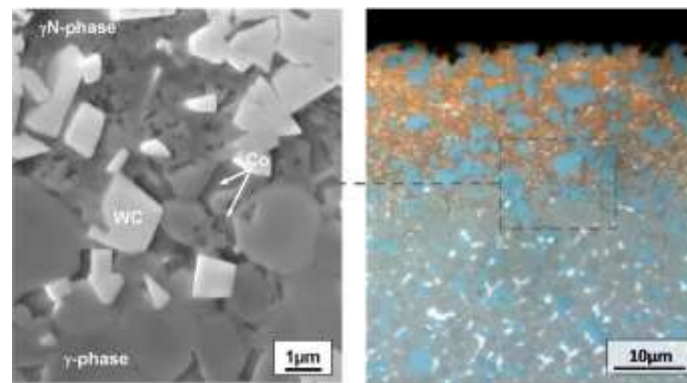
شکل (۱۲): تصویر میکروسکوپ نوری کاربید سمانته گرادانی WC-Ti-Ta-Nb-C-Co که در آن سطوح عاری از فاز گاما و گوشه غنی از فاز گاما در یک اینسرت نشان داده شده است. مناطق سفیدرنگ مربوط به بایندر کبالت، خاکستری مربوط به فاز زمینه (WC) و قهوه‌ای مربوط به فاز کاربید ثانویه (گاما) هستند. تصویر سمت چپ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه گرادانی سطح است [۸۹].

این تحقیق از کاربیدهای مکعبی (NbC, TaC, TiC)، برای تشکیل لایه‌های سطحی مقاوم به سایش استفاده شد. کاربیدهای سمانته حاوی کاربیدهای مکعبی بین ۵ تا ۳۳ درصد وزنی، در اتمسفر نیتروژن با فشار ۵ بار تف‌جوشی شدند. فرآیند نیتراسیون در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد (تف‌جوشی در فاز مایع) و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (تف‌جوشی در فاز جامد) انجام شد. تشکیل لایه‌های سطحی مقاوم در برابر سایش به نسبت $TiC/(Ta,Nb)C$ بستگی دارد. نیتریده کردن در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به تشکیل لایه‌های سطحی با محتوای TiC بالاتر از ۳ درصد شد [۱۱۰]. تشکیل لایه‌های گرادانی بر روی کاربیدهای سمانته، یک فرآیند کنترل شده با نفوذ است که در آن بایستی ترمودینامیک واکنش‌های بین Ti و نیتروژن نیز مدنظر قرار گیرد [۱۱۱]. نتایج این تحقیق نشان داد که لایه‌های سطحی سخت از کربونیتریدهای مکعبی و نیتروژن با هدف افزایش مقاومت به سایش ایجاد شدند (شکل (۱۳)). تأثیر ترکیب شیمیایی کاربیدهای مکعبی (TiC, TaC, NbC) و همچنین تأثیر دماهای تف‌جوشی بر تشکیل فاز گاما در کاربیدهای سمانته گزارش شده است. نتایج نشان داده است که ضخامت سطح خارجی غنی از فاز گاما با افزودن آهن به بایندهای کبالت و نیکل، افزایش یافته است [۱۱۲].

برای کاربیدهای سمانته حاوی نیتروژن از نوع WC-Ti(C,N)-Co، در طی تف‌جوشی در خلأ در دماهای ۱۱۰۰ تا ۱۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، گاز نیتروژن در اثر تجزیه نیتریدها و یا کربونیتریدها به وجود می‌آید. امروزه محققین بر روی تولید، مشخصه‌یابی و مدل‌سازی کاربیدهای سمانته گرادانی عاری از فاز گاما از طریق: دی‌نیتراسیون کاربیدهای سمانته حاوی TiN در اتمسفر خلأ، نیتراسیون در مرحله‌ای از تف‌جوشی (که تخلخل‌ها از نوع باز باشند) و سپس دی‌نیتراسیون آن متمرکز شده‌اند. کاربیدهای سمانته گرادانی عاری از فاز گاما را می‌توان با تف‌جوشی نیتراسیونی تولید نمود [۱۰۷].

۲-۵- کاربیدهای سمانته گرادانی غنی از فاز گاما

نوع دیگری از کاربیدهای سمانته گرادانی که کاربردهای زیادی در ابزار برش پیدا کرده‌اند، گرادان‌های سطحی غنی از فاز گاما هستند [۱۰۸]. در این نوع کاربیدها، سطح کاربید از فاز گاما غنی می‌شود تا مقاومت به سایش آن افزایش یابد و بخش توده ماده، عاری از فاز گاما است [۱۰۹]. تولید سطوح گرادانی در کاربیدهای سمانته و سرمت‌ها از جمله مباحثی است که به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از راه‌های غنی‌سازی سطح کاربید با فاز گاما، نیتریده کردن آن است که امروزه به یکی از مهم‌ترین موضوعات تحقیقاتی تبدیل شده است. غنی‌سازی لایه‌های سطحی با فاز گاما توسط نیتریده کردن کاربیدهای سمانته توسط گارسیا و همکارانش^{۲۷} [۱۱۰] گزارش شده است. در



شکل (۱۳): تصویر میکروسکوپ نوری (سمت راست) کاربید سماتنه گرادایانی WC-Ti-Ta-Nb-C-Co که در آن بخشی از سطح غنی از فاز گاما و حاوی نیتروژن است (منطقه قهوه‌ای رنگ). تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک بین منطقه گرادایانی و توده ماده (سمت چپ) [۱۱۲].

۳-۵- کاربیدهای سماتنه با خواص دوگانه

در این نوع از کاربیدها، فاز بایندر طوری توزیع می‌شود که سطح ماده در مقایسه با درون آن خواص متفاوتی داشته باشد. برای مثال یک کاربید سماتنه WC-Co با خواص چندگانه و متشکل از سه منطقه متفاوت را می‌توان در نظر گرفت. این مناطق شامل سطح حاوی WC و کبالت کم و بنابراین سختی بالا، منطقه میانی متشکل از WC و مقدار کبالت بیشتر و بنابراین چقرمگی بالا و در نهایت مغز قطعه متشکل از WC و فاز اتا و مقادیری میانگین از کبالت؛ بنابراین می‌توان کاربیدهای سماتنه با توزیعی از خواص را تهیه نمود که سطوح آن‌ها دارای مقاومت به سایش بالاتر و مغز آن‌ها دارای چقرمگی بالاتر باشند. کاربیدهای سماتنه دو لایه نیز کاربیدهایی هستند که دارای اندازه ذرات متفاوتی از WC، مقدار متفاوتی از فاز بایندر و ترکیبات شیمیایی متفاوت در دو ناحیه از قطعه باشند. البته لازم به ذکر است که اعوجاج‌هایی در نتیجه اختلاف در مقدار انقباض در طی تف‌جوشی فاز مایع نیز در کامپوزیت‌های WC-Co دولا به وجود می‌آیند که با کنترل مقدار فاز بایندر و فرآیند تف‌جوشی می‌توان آن‌ها را مدیریت نمود [۱۱۳].

۶- بایندهای مورد استفاده در کاربیدهای سماتنه

بایندها، بخش فلزی سمرتها و کاربیدهای سماتنه را تشکیل می‌دهند و به مانند یک چسب فلزی در زمینه سرامیک عمل می‌کنند. بایندها چقرمگی سمرتها را

افزایش داده و مانع از شکندگی آن‌ها می‌شوند [۴۷]. بخش فلزی کاربیدهای سماتنه برای تشکیل مایع، در تف‌جوشی فاز مایع، بسیار ضروری است. همچنین این فاز مسئول چقرمگی در کاربیدهای سماتنه می‌باشد. مهم‌ترین فلزات مورد استفاده در این حوزه عبارت‌اند از کبالت، نیکل و سپس آهن می‌باشند. دلایل استفاده از کبالت، ترشوندگی بهتر WC، و همچنین ایجاد خواص مکانیکی برجسته مانند چقرمگی و استحکام بالا توسط آن می‌باشد. اما به علت برخی محدودیت‌ها (مانند سمی بودن کبالت)، تلاش‌ها در راستای جایگزین کردن کبالت با سایر بایندها افزایش یافته است [۱۱۴-۱۱۵]. کبالت هگزآگونال خالص تا دمای ۴۱۷ درجه سانتی‌گراد پایدار بوده و در دماهای بالاتر، فاز مکعبی آن (fcc) نیز پایدار است [۱۱۶]. پس از اتمام تف‌جوشی و تکمیل انجماد فاز بایندر، فاز کبالت fcc در ساختار به جا می‌ماند. انحلال تنگستن و انبساط حرارتی بیشتر کبالت در مقایسه با فاز سخت کاربید تنگستن، منجر به تحت کشش قرار گرفتن فاز بایندر پس از سرمایش خواهد شد. در نتیجه تنش‌های باقیمانده در آن منجر به ایجاد عیوب سطحی مانند دوقلویی، و نقص انباشتگی خواهد شد [۱۱۷]. بایندر نیکل به عنوان جایگزین کبالت پیشنهاد می‌شود؛ اما به دلیل انرژی نقص انباشتگی بالاتر آن (۱۲۵ میلی ژول بر مترمربع در مقایسه با ۲۰ میلی ژول بر مترمربع برای کبالت)، کار سختی متوسطی داشته و بنابراین در حین رشد و پیشروی ترک در این فاز، انرژی بسیار کمی از ترک اتلاف خواهد شد (ترک راحت تر رشد می‌نماید) [۱۱۸]. آهن نیز مقبولیت صنعتی

فوق سریع انجام شد. پس از بررسی‌های لازم، ملاحظه شد که افزودن عناصر تیتانیوم و وانادیم منجر به بهبود خواص مکانیکی سمرت WC-Co (نظیر سختی، چقرمگی و استحکام) شده است.

کاربیده‌های سمانته با بایندهای آهن - نیکل - کبالت به دلیل استحکام خستگی و چقرمگی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. هم‌اکنون بایندر مذکور تحت نام تجاری AMPERSINT تولید می‌شود [۱۲۶]. کاربیده‌های سمانته WC-Ni عملکرد بهتری در مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی نسبت به کاربیده‌های سمانته WC-Co دارند. بنابراین کاربیده‌های سمانته WC-Ni در قطعات مقاوم به سایش و خوردگی به‌طور هم‌زمان، کاربرد دارند. اما خواص مکانیکی این کاربیده‌ها (سختی و استحکام) نسبت به کاربیده‌های WC-Co نسبتاً متعادل‌تر می‌باشند. عیب اصلی آن‌ها استحکام مکانیکی کمتر در مقایسه با کاربیده‌های سمانته پایه کبالت است. البته عملکرد این نوع از کاربیده‌ها را می‌توان با تولید ریزساختارهای میکرو و تا حدودی نزدیک به نانو و همچنین ممانعت از رشد دانه‌های WC بهبود داد. با افزودن کاربیده‌های دیگر نیز می‌توان استحکام و یا سختی زمینه کاربیده‌های سمانته WC-Ni را افزایش داد. برای مثال تاکنون کاربیده‌های سمانته WC-Ni با افزودن VC و TaC به‌عنوان ممانعت‌کننده رشد دانه‌های WC توسط تف‌جوشی جرقه پلاسما تهیه شده‌اند که دارای ترکیبی از استحکام و سختی مناسب بوده‌اند [۱۲۷]. در این حوزه، تحقیقات متفاوتی مانند استفاده از فولادهای زنگ‌نزن پیش‌آلیاژی به‌عنوان بایندر با هدف بهبود مقاومت به خوردگی کاربیده‌های سمانته [۱۲۸]، استفاده از کروم و نیکل در کنار بایندر کبالت به‌منظور افزایش مقاومت به اکسیداسیون، استفاده از کروم - آهن [۱۲۹]، استفاده از سیلیسیم در کنار بایندر نیکل با هدف بهبود استحکام و چقرمگی شکست، در مقایسه با کاربیده‌های سمانته WC-Co انجام شده است [۱۳۰].

۶-۳- آلیاژهای آنتروپی بالا به‌عنوان بایندر

نداشته، چرا که در طی سرمایش، فاز مارتنزیت ایجاد می‌شود. البته با ترکیبی از کبالت، نیکل و آهن با نسبت‌های متفاوت نتایج قابل قبولی، به‌ویژه در کاربردهای برش چوب، حاصل شده است [۱۱۹]. فاز بایندر یا اتصال‌دهنده که جایگزین کبالت می‌شود، بایستی ترشوندگی مناسبی با WC داشته باشد و همچنین با آن واکنش ندهد. مضاف بر این، بایندر بایستی از تشکیل فازهای اضافی در کاربرد نیز جلوگیری نماید [۱۱۵]. امروزه اغلب از ترکیبات مختلفی شامل آهن، نیکل، کبالت، مولیبدن و کروم و همچنین آلیاژهای آن‌ها، به‌عنوان بایندر در سمرت‌های پایه کاربیدی [۱۲۰] و نیتریدی استفاده می‌شود [۱۲۱]. علاوه بر این، از دسته جدیدی از مواد که آلیاژهای آنتروپی بالا^{۲۸} نام دارند، امروزه به‌عنوان بایندر استفاده می‌شود. آلیاژهای آنتروپی بالا معمولاً از حداقل پنج عنصر تشکیل می‌شوند [۱۲۲]. آلیاژهای آنتروپی بالا، به دلیل ترشوندگی مناسب با زمینه سرامیکی، سختی مناسب در دماهای بالا و بهبود چقرمگی شکست، نقش مهمی در ساخت سمرت‌ها ایفا می‌کنند [۱۲۳].

۶-۱- بایندر آهن - نیکل - کبالت

اخیراً کاربیده‌های سمانته عاری از کبالت مورد توجه فراوانی قرار گرفته‌اند، چرا که کبالت دارای مخاطراتی برای سلامتی انسان می‌باشد. کیم و همکارانش^{۲۹} [۱۲۴]، سمرت‌های پایه WC با Ni به‌عنوان فاز بایندر را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها توانستند سمرت‌های WC-Ni را با چگالی ۹۸ درصد و با استفاده از تف‌جوشی حرارتی القایی بسامد بالا تولید کنند. اندازه دانه‌های کاربید تنگستن در نمونه‌های تف‌جوشی شده برابر ۰/۳ میکرومتر بوده است. مقادیر سختی به‌طور قابل توجهی بالاتر از سختی سیستم‌های WC-Co بوده و همچنین کاهش قابل توجهی در چقرمگی شکست نمونه‌ها رخ نداده است. در پژوهشی دیگر غزالی و همکارانش^{۳۰} [۱۲۵]، اثر افزودن وانادیوم و تیتانیوم به سمرت‌های WC-Co را بررسی کردند. آن‌ها از ۵ درصد وزنی کبالت و ۵ درصد وزنی وانادیوم به همراه تیتانیوم به‌عنوان فاز بایندر استفاده نمودند. تف‌جوشی پودرهای مخلوط شده با روش ماکروویو

امروزه استفاده از آلیاژهای آنتروپی بالا به‌عنوان بایندر در کاربردهای سمانته مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. این توجه ناشی از خواص ایجاد شده توسط این نوع از بایندها در کاربردهای سمانته است. افزایش سختی ناشی از ایجاد محلول جامد و افزایش پایداری شیمیایی بایندر و فازهای کاربریدی نیز از جمله مزایای استفاده از این نوع مواد در کاربردهای سمانته است. استفاده از بایندهای آلیاژی آنتروپی بالا در کاربردهای سمانته و سرب‌ها مورد بررسی گسترده قرار گرفته است. در کاربردهای سمانته عمدتاً از بایندهای آلیاژی آنتروپی بالای فلزی متشکل از عناصر اصلی شامل آهن، نیکل، کبالت، کروم و تنگستن استفاده می‌شود. خواص مکانیکی گزارش شده برای سرب‌های تهیه شده با این نوع از بایندها، حاکی از تردی آنها می‌باشد [۱۳۱-۱۳۲]. مقادیر چقرمگی شکست آنها در بازه ۴ تا $7 \text{ MPa.m}^{0.5}$ (۲۰ درصد وزنی بایندر) و میزان سختی آنها 1300 تا 1700 ویکرز گزارش شده است [۱۳۳]. این خواص معادل خواص یک کاربرید سمانته WC-Co با ۲۰ درصد وزنی کبالت است که دارای اندازه دانه کاربرید تنگستن نسبتاً درشت، اما با چقرمگی شکست یک پنجم می‌باشد. در تحقیقی دیگر چقرمگی شکست کاربرید سمانته WC با ۲۰ درصد وزنی بایندر آلیاژ آنتروپی بالا، برابر $17/4 \text{ MPa.m}^{0.5}$ گزارش شده است که مقدار بسیار مناسبی است [۱۳۴]. ناکونچنی و همکارانش^{۳۱} از آلیاژ آنتروپی بالا با ترکیب Fe-Cr-Ni-W-Mo تهیه‌شده با روش آلیاژسازی مکانیکی به‌عنوان بایندر WC استفاده نمودند. در این تحقیق کاربرید سمانته WC-10Fe-Cr-Ni-W-Mo توسط پرتو الکترونی تف‌جوشی شد. نتایج نشان داد که بایندر مذکور به صورت محلول جامد تک‌فاز با شبکه مکعبی مرکزدار (BCC) می‌باشد. این فاز دارای پایداری حرارتی بالایی بوده و همچنین در فرآیند تف‌جوشی از رشد دانه‌های WC نیز ممانعت نموده است. مضاف بر این، فاز مذکور هیچگونه برهمکنش مستقیمی با فاز WC در حین تف‌جوشی نداشته است؛ بنابراین، امکان ساخت کاربردهای سمانته کاربرید تنگستن - بایندر آلیاژهای آنتروپی بالا با خواص مکانیکی

بالا به‌عنوان جایگزینی برای کاربردهای سمانته WC-Co وجود دارد [۱۳۵].

۶-۳- بایندهای نیکل - آلومینیوم، آلومینیوم - آهن و روتنیوم

علاوه بر بایندهای آهن، کبالت و نیکل، برخی از تحقیقات بر وی استفاده از ترکیبات بین فلزی مانند Fe_3Al ، Ni_3Al و... به‌عنوان بایندر انجام شده است. Ni_3Al یک ترکیب معروف در سوپر آلیاژهای پایه نیکل در دماهای بالاست که مقاومت به خوردگی و استحکام ویژه‌ای به آنها (پره‌های توربین) اعطا می‌کند. از آنجایی که لبه‌های ابزارهای برش در طی ماشین‌کاری در معرض دماهای بالا قرار می‌گیرند، بنابراین می‌توان از این ماده به‌عنوان بایندر در کاربرید سمانته استفاده کرد. تاکنون WC- Ni_3Al با روش تف‌جوشی جرقه پلاسما [۱۳۶] و همچنین کاربرید سمانته WC-Co-Ni-Al با بایندر Ni_3Al تهیه شده‌اند [۱۳۷]. ادعا شده است که سختی کاربرید سمانته مذکور در دماهای داغ در مقایسه با کاربردهای سمانته پایه کبالت بالاتر بوده است. همچنین تخریب و لایه‌ای شدن و جدایش دانه‌های WC در آن اتفاق نیفتاده است. Fe_3Al دارای مدول الاستیک بالا و سختی بالایی بوده و بنابراین در محیط‌های تریبولوژیکی قابل استفاده است. این مواد نیز در دماهای بالا مقاومت به سایش بالاتری نسبت به آلومینیدهای نیکل یا کبالت و یا فولادهای زنگ‌زن ۳۰۴ دارند [۱۳۸]. مضاف بر این، WC ترشوندگی مناسبی با FeAl دارد. نتایج بررسی محققان نشان داده است که مقاومت به سایش کامپوزیت‌های WC-FeAl نسبت به کامپوزیت‌های WC-Co بالاتر بوده، اما چقرمگی شکست آنها کمتر بوده است چرا که انعطاف‌پذیری بایندر FeAl پایین‌تر می‌باشد. البته با افزودن عناصری مانند بور به کامپوزیت‌های با ترکیب WC-FeAl-B می‌توان چقرمگی، مقاومت به سایش و ممانعت از رشد دانه کاربرید تنگستن را افزایش داد [۱۳۹]. اخیراً، خواص سایشی کامپوزیت‌های پایه کاربرید تنگستن با ترکیب WC/40vol%(FeAl-B) نسبت به کامپوزیت WC-40 vol%Co و به‌ویژه WC-16 vol%Co (H10F) مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که کامپوزیت با

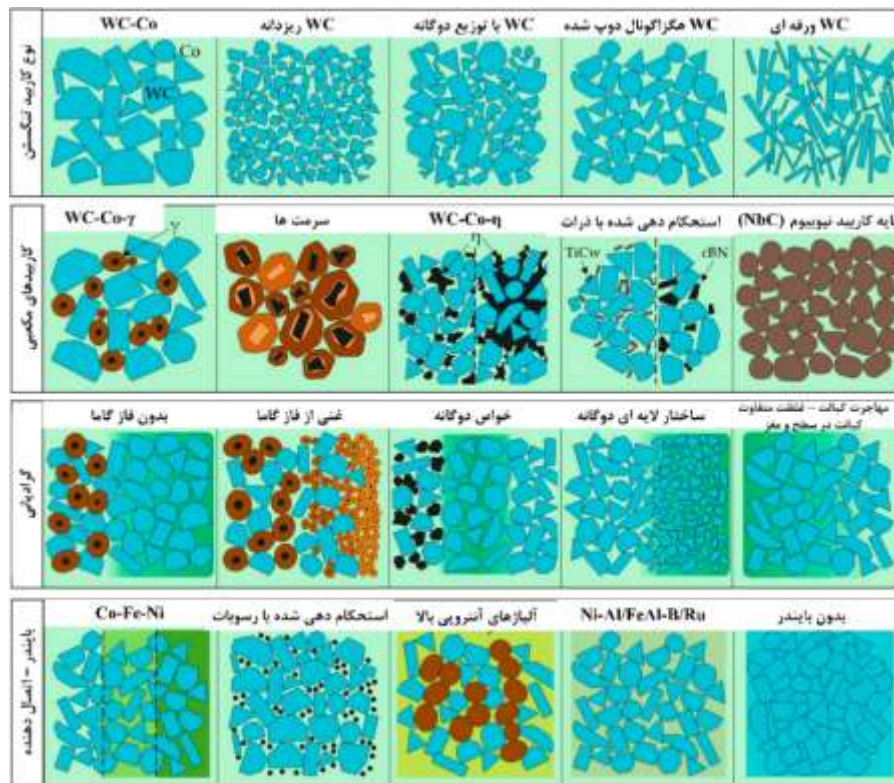
ترکیب (FeAl-B) 40vol% WC/ از دمای محیط تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت به سایش بالاتری نسبت به WC-Co داشته که به سختی بالاتر و استحکام بالاتر آن در دماهای بالا به دلیل زمینه FeAl-B در مقایسه با زمینه کبالت نسبت داده شد [۱۴۰]. افزودن روتنیوم به کاربید سمانته WC-Co منجر به افزایش سختی آن‌ها، بدون افت چقرمگی، خواهد شد. همچنین افزودن روتنیوم به کاربید سمانته WC-Co منجر به افزایش مقاومت به خوردگی، به دلیل رسوب سختی فاز بایندر در نتیجه محلول جامد بایندر Co-Ru با ساختار هگزگونال، در دماهای بالا در مقایسه با WC-Co شده است. تاکنون از کاربیدهای سمانته WC-Co-Ru در صنایع پرش استفاده شده است [۱۴۱-۱۴۳].

۶-۴- کاربیدهای سمانته بدون بایندر

در کاربیدهای سمانته بدون بایندر، تنها از فاز سخت استفاده می‌شود و در ترکیب آن‌ها هیچگونه بایندر فلزی، به‌جز ناخالصی‌هایی ممکن در پودر یا مواد خام اولیه، به کار برده نمی‌شود [۹]. معمولاً کاربیدهای سمانته WC-Co را می‌توان در کوره‌های خلأ و در دماهای متوسط به نحوی تف‌جوشی نمود که بتوان به چگالی‌های کاملی دست یافت. یکی از تفاوت‌های فرآیندی در کاربیدهای سمانته بدون بایندر، الزام استفاده از دماهای بالاتر و فشارهای بالاتر برای دست‌یابی به چگالی‌های بالاست، چرا که در این کاربیدها هیچگونه بایندر فلزی قابل ذوب و توزیع شونده مؤثر در فرآیند تف‌جوشی وجود ندارد. در این حالت استفاده از

پودرهای بسیار ریز WC در بهبود تف‌جوشی مؤثر است. همچنین کنترل مستقیم رشد دانه بسیار مهم می‌باشد. مورد مهم بعدی، مقدار کربن است. چرا که در عدم حضور کبالت یا هر بایندر فلزی دیگر، کمبود کربن منجر به تشکیل استوکیومتری W_2C و افزایش آن منجر به رسوب گرافیت در کاربیدهای سمانته خواهد شد [۱۴۴]. محققین دریافته‌اند که استفاده از ممانعت‌کننده‌های رشد دانه نظیر کروم، تأثیر شدیدی بر اندازه دانه‌های WC خواهد گذاشت و همچنین سایر افزودنی‌ها نظیر کاربیدهای مکعبی TiC و TaC نیز منجر به بهبود خواص مکانیکی آن‌ها خواهد شد. خواص مکانیکی کاربیدهای سمانته WC-TiC-TaC بدون بایندر و افزودنی‌های Cr_3C_2 و VC بررسی شده است [۱۴۵]. افزودن بیش از حد VC تأثیری منفی بر استحکام و تأثیر مثبت بسیار کم بر سختی گذاشته است. محققین دلیل آن را به رسوب توده‌ای شکل VC مرتبط دانسته‌اند. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، این رسوبات منجر به تردی کاربید سمانته WC-Co می‌شوند. نبود بایندر فلزی چقرمگی و استحکام گسیختگی را به شدت کاهش داده و به همین دلیل این نوع از مواد در کاربردهایی مانند آب‌بندهای مکانیکی که مقاومت به فرسایش و خوردگی از اهمیت بالایی برخوردارند، استفاده می‌شوند.

بر اساس مطالب ارائه شده در بند (۳) تا (۶-۴)، می‌توان شماتیکی از ریزساختارهای مختلف در کاربیدهای سمانته را به صورت شکل (۱۴) ارائه داد.



شکل (۱۴): دسته‌بندی ریزساختارهای کاربیدهای سمانته [۷۲].

۷- معرفی برخی دیگر از سرمت‌ها

از گذشته تاکنون، اغلب از کاربیدها، نیتريد‌ها، کربونیتريد‌ها و برخی اکسیدها به عنوان فازهای سرامیکی در سرمت‌ها استفاده شده است [۱۴۶]. مهم‌ترین کاربرد که در حدود یک قرن گذشته بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، کاربید تنگستن (WC) می‌باشد. خواص برتر سرمت‌های WC-Co از جمله مدول الاستیک بالا، چقرمگی بالا، سختی بالا و مقاومت به سایش بالا، موجب شده است تا این ماده همچنان کاربردهای وسیعی در صنایع متفاوت داشته باشد [۱۴۷]. اما برخی عیوب در سرمت‌های WC-Co (مانند سمی بودن کبالت، گران قیمت بودن کاربید تنگستن، عملکرد نامطلوب در دماهای بالا و محیط‌های خورنده، مقاومت به اکسیداسیون پائین کبالت و...) موجب شد تا سیستم‌های بعدی سرمت‌ها نیز مورد تحقیق قرار گیرند. پس از سرمت‌های پایه کاربید تنگستن، سرمت‌های پایه کاربید تیتانیوم (TiC) و کاربید تانتالیوم (TaC) از سال ۱۹۳۰ مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین سرمت‌های پایه کربونیتريد تیتانیوم (TiCN) نیز در سال ۱۹۷۰ برای اولین بار معرفی

شدند [۱۴۶]. امروزه پیشرفت‌های گسترده‌ای بر روی این سیستم‌ها و برخی دیگر از سرمت‌های پایه اکسیدی نظیر اکسید آلومینیوم موجب شده است تا این سرمت‌ها، بسیار مهم و پر کاربرد باشند [۴۴]. در ادامه برخی دیگر از این سیستم‌ها معرفی می‌شوند.

۷-۱- سرمت‌های پایه آلومینا

از جمله خواص برتر در سرمت‌های پایه آلومینا، می‌توان به خواص فیزیکی و شیمیایی عالی، مقاومت مکانیکی نسبتاً مناسب و همچنین پایداری حرارتی و شیمیایی بالا اشاره کرد؛ اما به دلیل چقرمگی شکست پایین و مدول الاستیک بالا، این مواد بسیار شکننده هستند و همانند سایر سرمت‌ها نمی‌توان از آن‌ها در کاربردهایی نظیر ابزار برش استفاده کرد [۱۴۸]. تولید این نوع از سرمت‌ها، همواره با محدودیت‌هایی همراه بوده که به دلیل حساسیت بالا و شکنندگی ریزساختار آن‌ها می‌باشد. به دلیل پیوند ضعیف در سطح مشترک آلومینا و فلز بایندر در این نوع از سرمت‌ها، اثر بایندر فلزی ناچیز است [۱۴۹]. اما، به دلیل

۷-۳- سרمت‌های پایه TiCN

سرمت‌های پایه TiCN برای اولین بار در سال ۱۹۳۱ توسعه یافتند. از جمله کاربردهای اصلی این سרمت‌ها می‌توان به صنایع ماشین‌کاری و ابزار برش اشاره نمود. خواص ماشین‌کاری این سرمت‌ها را می‌توان با انتخاب ترکیب مناسب، بهینه‌سازی کرد. همچنین با افزودن برخی کاربیده‌های ثانویه به آن‌ها، می‌توان سختی و استحکام آن‌ها را افزایش داد [۱۵۷]. از بین سرمت‌های پایه TiC و پایه TiCN، سرمت‌های پایه TiCN به دلیل سختی بالاتر در دماهای بالا، مقاومت به اکسیداسیون بهتر، چقرمگی و هدایت حرارتی بهتر، نسبت به سیستم‌های پایه TiC برتری دارند. مقایسه برخی از خواص این دو سیستم در جدول (۲) بیان شده است [۳۱].

جدول (۲): مقایسه برخی از خواص سرمت‌های پایه کاربید تیتانیوم و پایه کربونیتريد تیتانیوم.

سیستم سرمت	میکروسختی (GPa)	استحکام (MPa)	هدایت حرارتی (W/mK)
پایه TiC	۴٫۹	۱۰۵۰	۲۴٫۷
پایه TiCN	۵٫۹	۱۳۶۰	۴۲٫۳

۸- خواص و کاربرد سرمت‌ها

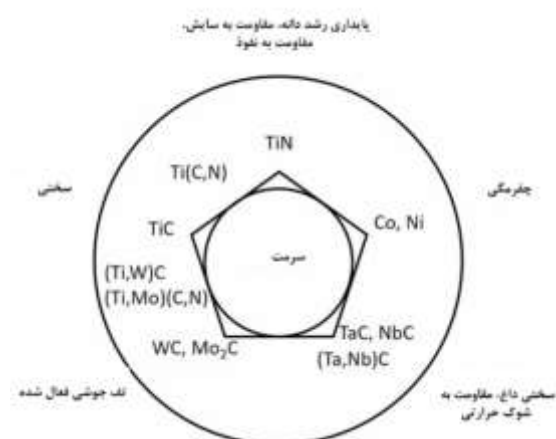
کاربیده‌های سمانته و سرمت‌ها، از مهم‌ترین مواد سخت هستند که به دلیل سختی، چقرمگی و مقاومت به سایش بالا، از سال‌های گذشته تاکنون در ابزارهای برشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۱]. به‌طور کلی سال‌هاست که دو گروه از کاربردهای پایه WC با بایندهای کبالت WC-Co و بایندهای نیکل WC-Ni ساخته شده‌اند و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵۸]. کاربردهای سمانته بسته به فرآیند ساخت و اجزاء آن‌ها، خواص متفاوتی از خود نشان می‌دهند و بنابراین کاربردهای متفاوتی نیز خواهند داشت. برای مثال کاربرد سمانته WC-Co سختی بالایی، به دلیل ترشوندگی کاربرد تنگستن با کبالت، داشته و بنابراین برای ابزارهای برش مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزودن کاربیدهایی نظیر کاربرد تیتانیوم، کاربرد تانتالیوم، و کاربرد نیوبیوم به کاربرد تنگستن با بایندهای کبالت، نیز منجر به بهبود مقاومت به خوردگی

پایداری حرارتی و شیمیایی مناسب، همواره از این نوع سرمت‌ها می‌توان در کاربردهای دما بالا به‌عنوان عایق حرارتی و الکتریکی استفاده کرد [۱۵۰]. یکی از راه‌های افزایش چقرمگی در سرمت‌های پایه آلومینا، استفاده از بایندهای فلزی مناسب می‌باشد، که توزیع ذرات خوبی در زمینه آلومینا داشته باشند. میراندا-فرناندز و همکارانش [۱۴۸]، از بایندهای آلومینیوم، آهن و تیتانیوم در زمینه آلومینا استفاده کردند. آن‌ها با روش متالورژی پودر و بدون اعمال فشار این سرمت‌ها را تهیه نمودند. نتایج نشان داد که ذرات آهن و آلومینیوم، به‌خوبی در زمینه آلومینا توزیع و چقرمگی آن را تا $4/1 \text{ MPa.m}^{0.5}$ افزایش دادند [۱۴۸].

۷-۲- سرمت‌های پایه TiC

همان‌طور که بیان شد، چالش‌ها و محدودیت‌های سیستم WC-Co، موجب شد سرمت‌های مبتنی بر TiC پدیدار و مورد تحقیق قرار گیرند [۱۵۱]. از آنجایی که TiC ضریب اصطکاک پایین‌تر، مقاومت به اکسیداسیون بالاتر و چگالی بسیار کمتری نسبت به WC دارد، بنابراین می‌تواند در برخی از کاربردها موفق‌تر از سرمت‌های پایه WC عمل کند [۱۵۲-۱۵۳]. اما این ماده در مقایسه با WC، دارای استحکام و مقاومت به سایش کمتری می‌باشد. امروزه با پیشرفت سرمت‌های پایه TiC و به دلیل سختی بالای ذاتی TiC، از آن‌ها به‌طور گسترده در تجهیزاتی مانند سکوها حفاری استفاده می‌شود [۱۵۴]. مزیت دیگری که سرمت‌های پایه TiC نسبت به سرمت‌های پایه WC دارند، قابلیت پوشش‌دهی آن‌ها بر روی سایر قطعات می‌باشد. به دلیل اکسیداسیون بالای WC در دماهای ۴۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، از این سرمت‌ها نمی‌توان برای پوشش‌دهی استفاده نمود [۱۵۵]. یکی از بایندهای مفید در این سرمت‌ها، نیکل می‌باشد که معمولاً در ابزارهای برش در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد از آن در ترکیب سرمت استفاده می‌شود. یکی از چالش‌های تولید آلیاژهای ریزدانه و با کیفیت بالا و عاری از تخلخل در این حوزه را می‌توان با افزودن کاربرد مولیبدن در حدود ۱۰ درصد، که منجر به تف‌جوشی سریع‌تر سرمت خواهد شد، حل نمود [۱۵۶].

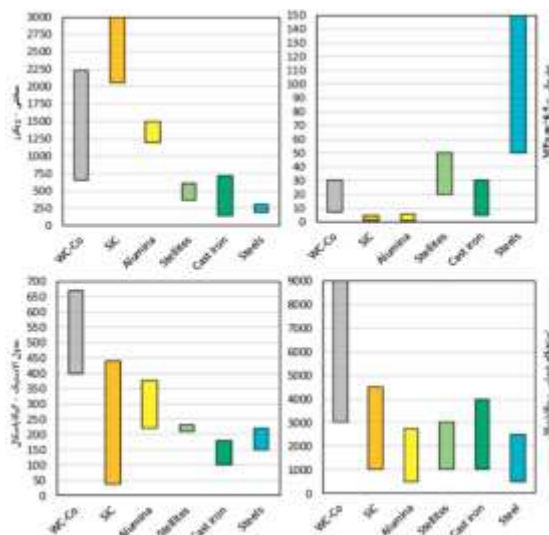
کاربیدهای سمانته WC-Co خواهد شد [۳۱، ۱۵۹-۱۶۲]. در شکل (۱۵) اطلاعاتی فشرده از اجزاء تشکیل‌دهنده سרمت‌ها و تأثیر آن‌ها بر خواص و رفتار تف‌جوشی سرمت‌ها نشان داده شده است [۱۶۳].



جدول (۳): مشخصه‌های برخی از هاردمتال‌ها و سرمت‌ها و کاربرد آنها [۱۶۴].

کاربرد	درصد وزنی	اندازه دانه (میکرومتر)	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)
مته‌های مورد استفاده در ساخت مدارهای مجتمع، پانچ‌های چاپگرهای جوهرافشان، میکروافزارها	۸-۱۲	نانو کمتر از ۰/۲	WC-Co
ابزار برش چوب، قطعات مقاوم به سایش	۲-۴	فوق‌ریز	WC-Co
میکرومته‌ها برای ساخت مدارهای مجتمع، اینسرت‌های برشکاری	۶-۹	۰/۲-۰/۵	WC-Co
ابزارهای ساینده و تیغه‌های دوار (فرزها)، تیغه‌های برش کاغذ	۱۰-۱۶	زیرمیکرون	WC-Co
اینسرت‌های برشکاری، ابزارهای ساینده و تیغه‌های دوار (فرزها)	۴-۱۶	۰/۵-۰/۸	WC-Co
اینسرت‌های برشکاری، قطعات سایش، ابزارهای فرم‌دهی غیربرشی	۴-۲۵	ریز ۰/۸-۱/۳	WC-Co
اینسرت‌های برشکاری برای برش‌های سنگین، ابزارهای فرم‌دهی غیربرشی	۴-۲۵	متوسط ۱/۳-۲/۵	WC-Co
ابزارهای برش سنگ	۴-۲۵	درشت ۲/۵-۶	WC-Co
ابزارهای فرم‌دهی	۴-۲۵	خیلی درشت بزرگ‌تر از ۶	WC-Co
قطعات غیر مغناطیسی مقاوم به خوردگی در تجهیزات شیمیایی مهندسی	۴-۲۰	۰/۵-۲	WC-Co
ابزارهای برش برای فولادها	۴-۱۵	۰/۵-۲	WC-Co
ابزارهای برش برای فولادها	۵-۲۰	۰/۵-۳	سرمت‌ها

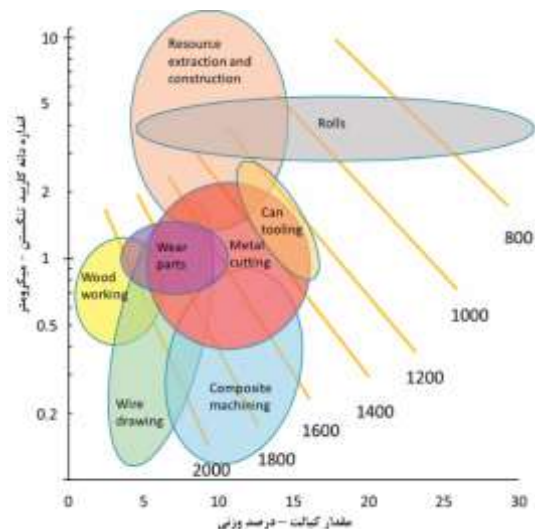
در واقع می‌توان گفت طبقه‌بندی کاربیدهای سمانته پایه کاربرد تنگستن برای کاربردهای مختلف، بر اساس میزان کبالت و اندازه دانه‌های WC نیز صورت می‌گیرد. بر این



شکل (۱۷): خواص متفاوت مواد مختلف در مقایسه با کاربید سمانته WC-Co [۸۷، ۱۶۵].

همان‌طور که قبلاً بیان شد، کاربیده‌های سمانته متشکل از کاربیده‌های سخت و دیرگداز، نیتrideها و کربونیتrideهای فلزات انتقالی (گروه ۴، ۵ و ۶ در جدول تناوبی) در کنار بایندرهای داکتیل فلزی می‌باشند. فازهای اصلی موجود در کاربیده‌های سمانته شامل WC هگزاگونال، مخلوطی از کربونیتريد / کاربید مکعبی (که فاز گاما یا فاز FCC نیز نامیده می‌شود) و فاز بایندر کبالت می‌باشند که می‌توان به جای کبالت از نیکل یا ترکیبی از فلزات آهن - کبالت - نیکل نیز استفاده نمود. فاز گاما از کربونیتrideهای گروه ۴ و ۵ جدول تناوبی تشکیل می‌شود. همچنین فاز گاما با عناصر بین نشین و جانشین، محلول‌های جامد یکنواختی ایجاد می‌کند. برخی از خواص کاربیده‌ها و یا نیتrideهای تشکیل‌دهنده کاربیده‌های سمانته در جدول (۴) آورده شده‌اند [۱۶۶-۱۶۷]. همچنین در جدول (۵) فرآیندهای تف‌جوشی متفاوت برای تهیه سרمت‌های مختلف و برخی از خواص آن‌ها آورده شده‌اند [۸].

اساس، همان‌طور که در شکل (۱۶) ملاحظه می‌شود، این کاربیده‌ها در کاربردهایی نظیر کشش سیم، ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها، ابزارهای برش چوب، ابزار برش فلزات، قطعات مقاوم به سایش، ساخت ابزارآلات، معدن‌کاری و استخراج معادن و... مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷۲].



شکل (۱۶): کاربردهای مختلف کاربیده‌های سمانته WC-Co، بر اساس اندازه دانه WC و درصد وزنی کبالت [۷۲].

خواص کاربیده‌های سمانته به ترکیب اجزاء سازنده آن‌ها، نسبت مناسب اجزاء و همچنین پارامترهای فرآوری وابسته می‌باشد. به نحوی که می‌توان گستره وسیعی از خواص مکانیکی را در این کاربیده‌ها به دست آورد. در شکل (۱۷) خواص مکانیکی شامل سختی، چقرمگی، استحکام و مدول الاستیک برخی از مواد با کاربیده‌های سمانته WC-Co مقایسه شده است [۸۷، ۱۶۵].

جدول (۴): برخی از خواص کاربردها و یا نیتريد‌های تشکیل دهنده کاربردهای سمانته [۱۶۶-۱۶۷].

ترکیب	پارامترهای شبکه (nm)	چگالی (gcm^{-3})	میکروسختی (GPa)	نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	مدول الاستیک (GPa)	هدایت حرارتی (W/mK)
WC	$a = 0.29058$ $c = 0.28365$	۱۵.۷۲	۲۳	۲۷۷۶	۷۰۷	۱۲۰
Mo ₂ C	$a = 0.30233$ $c = 0.47344$	۹.۱۸	۱۷	۲۵۲۰	۵۳۰	۱۵
Cr ₃ C ₂	$a = 0.28290$ $b = 0.55329$ $c = 1.14719$	۶.۶۸	۲۷	۱۸۱۰	۳۸۰	۱۴
TiC	۰.۴۳۲۸	۴.۹۳	۲۸	۳۰۶۷	۴۵۰	۲۸.۹
ZrC	۰.۴۷۰۰	۶.۴۶	۲۵	۳۴۲۰	۳۵۰	۲۴.۶
HfC	۰.۴۶۳۸	۱۲.۳	۲۰	۳۹۳۰	۴۲۰	۲۵.۱
VC _{0.88}	۰.۴۱۶۴	۵.۳۶	۲۶	۲۶۵۰	۴۳۰	۲۶.۸
NbC	۰.۴۴۷۰	۷.۷۸	۱۸	۳۶۱۰	۳۴۰	۲۷
TaC	۰.۴۴۵۵	۱۴.۴۸	۱۶	۳۹۸۵	۲۹۰	۲۲.۱
TiN	۰.۴۲۴۲	۵.۳۹	۱۷	۳۰۵۰	۴۲۰	۲۹

جدول (۵): روش‌های تف‌جوشی تعدادی از سرمته‌ها و برخی از خواص آنها [۸].

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	روش تف‌جوشی	سختی ویکرز	میانگین اندازه دانه (میکرومتر)
WC-Cr ₃ C ₂ -25NiCr	تف‌جوشی مقاومتی الکتریکی	1160 ± 42 (HV30)	-
WC-20Cr ₃ C ₂ -7Ni	تف‌جوشی مقاومتی الکتریکی	1110 ± 30 (HV30)	-
WC6Co	تف‌جوشی مقاومتی الکتریکی	1960 ± 15	-
WC6Co	تف‌جوشی - فشردن ایزواستاتیک داغ	1860 ± 15	-
WC6Co	تف‌جوشی مقاومتی الکتریکی	1750 ± 20	-
WC10Co	تف‌جوشی - فشردن ایزواستاتیک داغ	1620 ± 15 (HV30)	-
(Hf, Ta, Nb, Ti, V)C	تف‌جوشی - فشردن ایزواستاتیک داغ	2437 ± 47	$2/59 \pm 0/16$
(Hf, Ta, Nb, Ti, V)C	تف‌جوشی در خلأ	2573 ± 86	$3/46 \pm 0/18$
(Hf, Ta, Nb, Ti, V)C	تف‌جوشی جرقه پلاسما	2569 ± 56	$5/62 \pm 0/38$
(Ta, Nb, Ti, V, W)C	تف‌جوشی - فشردن ایزواستاتیک داغ	1873 ± 80	$15/2 \pm 0/82$
(Ta, Nb, Ti, V, W)C	تف‌جوشی در خلأ	2217 ± 40	$33/7 \pm 1/8$
(Ta, Nb, Ti, V, W)C	تف‌جوشی جرقه پلاسما	2021 ± 56 (HV0.5)	$31/2 \pm 1/81$
WC-Co	تف‌جوشی جرقه پلاسما	۱۸۳۶ (HV30)	۰/۲۸
ZrC-20%Mo	تف‌جوشی جرقه پلاسما	۲۲۳۱ (HV10)	۱ - ۲
Ti(C,N)-TiB ₂ -CTaC-Co	تف‌جوشی پرس داغ	۲۰۵۲ (HV10)	-
TiC-TiB ₂ -Ni(52.5/17.5/30)	فشردن ایزواستاتیک داغ	۱۹۵۰ (HV50)	-
WC-Co (9-10 wt.% Co)	تف‌جوشی جرقه پلاسما	-	۰/۴ - ۰/۸
WC-7 wt.% Co, 0.3wt.% CNT	تف‌جوشی جرقه پلاسما	۲۴۵۰ (HV30)	-
WCoB	تف‌جوشی جرقه پلاسما	۱۲۶۲ (HV30)	-
WCoB-9.356wt.%Cr	تف‌جوشی جرقه پلاسما	۱۷۵۱ (HV0.5)	-
cBN-WC-Co	تف‌جوشی جرقه پلاسما	۲۱۷۰ (HV30)	-
WC-5Co-2Cr ₃ C ₂	تف‌جوشی جرقه پلاسما	2105 ± 38 (HV30)	-
WC-5Co-2TaC	تف‌جوشی جرقه پلاسما	1725 ± 15 (HV30)	-
WC-Ni-ZrO ₂	فشردن ایزواستاتیک داغ	۱۶۰۰ (HV10)	۳ - ۵
WC-12Co-1%Cr ₃ C ₂	تف‌جوشی جرقه پلاسما	۱۸۷۲ (HV30)	-
WC-12Co	فشردن ایزواستاتیک داغ	۱۶۶۸ (HV30)	-
(Ti(CN))-WC-Mo-Ni/Ni + Co-C	تف‌جوشی در خلأ	1756 ± 52 (HV100)	۰/۶۴ $\pm$ ۰/۳
Ti(C,N)/Mo-Co Ni/CaF ₂ @Al ₂ O ₃	تف‌جوشی در خلأ	۲۴۴۰ (HV30)	-

	(HV30) ۱۴۶۶	تف‌جوشی در خلأ	(NbC-15 vol% Mo)-12%Ni
	(HV30) ۱۴۵۰	تف‌جوشی در خلأ	T70/FeCr20Mn20
۱ - ۵	(HV30) ۱۹۲۵	تف‌جوشی جرقه پلاسما	WC-7.5 wt.% NanoCo
-	(HV30) ۲۰۰۰	تف‌جوشی جرقه پلاسما	WC-12Co-1VC
-	(HV30) ۱۹۰۲	فشردن ایزواستاتیک داغ	WC-11 Co, 0.5 wt.%VC
-	(HV30) ۲۰۰۰	فشردن ایزواستاتیک داغ	WC-4.5CO-2Cr-5Ni
-	(HV30) ۱۵۲۰	فشردن ایزواستاتیک داغ	WC-Co-9wt.%YSZ

۹- نتیجه‌گیری

می‌باشند؛ و بنابراین روش‌های جدید تف‌جوشی برای به حداقل رساندن رشد دانه به کار گرفته می‌شوند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تف‌جوشی تحت فشار و روش‌های مبتنی بر جریان‌های پالسی اشاره نمود. سרمت‌های نامبرده شده در این مقاله، دارای سختی بالا، هدایت حرارتی عالی، سرعت براده‌برداری و ماشین‌کاری عالی و به‌طور کلی خواص مکانیکی مناسب برای کاربردهای مهمی همچون ماشین‌کاری و برش می‌باشند.

در این مقاله، انواع مختلفی از سרمت‌ها و هاردمتال‌ها یا کاربیدهای سمانته مورد بحث و بررسی قرار گرفت. از ترکیب خواص سرامیک‌ها با فلزات می‌توان موادی با خواص جدید ساخت. ترکیب شیمیایی اجزاء سازنده سרمت‌ها و اندازه دانه آن‌ها تأثیر مستقیمی بر خواص، به‌ویژه خواص مکانیکی، سרمت‌ها و کاربیدهای سمانته دارد. همچنین بهینه کردن مقدار افزودنی‌ها و شرایط تف‌جوشی منجر به ایجاد مرفولوژی‌های مناسب و در نتیجه خواص مکانیکی مناسب در سרمت‌ها خواهد شد. سازوکارهای تف‌جوشی و چگالش نقش مستقیمی بر ریزساختار این مواد دارند. کامپوزیت‌های کاربید تنگستن - کبالت خواص مکانیکی برجسته‌ای دارند که ناشی از ریزساختار آن‌ها می‌باشد. این کامپوزیت‌ها یکی از قدیمی‌ترین کاربیدهای سمانته می‌باشند که همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی دیگر از ریزساختارهای مهم شامل کاربیدهای حاوی فاز گاما، کاربیدهای حاوی فاز آتا و کاربیدهای گرادانی می‌باشند که مطالبی راجع به هر کدام ارائه شد. همچنین انواع بایندهای فلزی مانند کبالت، آهن، نیکل، روتنیوم و ترکیبی از آن‌ها و یا آلیاژهای آنتروپی بالا در این حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرآیند مرسوم ساخت سרمت‌ها، متالورژی پودر می‌باشد؛ اما به دلیل برخی از محدودیت‌ها در این روش، محققین به دنبال استفاده از روش‌های دیگری مانند ساخت افزایشی بوده‌اند. البته این روش مشکلاتی نظیر تخلخل در قطعات به همراه دارد.

تف‌جوشی این نوع از مواد غالباً به صورت تف‌جوشی در فاز مایع است. روش‌های تف‌جوشی مرسوم دارای محدودیت‌هایی نظیر زمان طولانی حرارت‌دهی و درشت شدن دانه‌های سרمت

۱۰- منابع

- [1] K. Schröter, "DRP 420.689: sintered hard metal alloy and procedure for its fabrication", US1549615, 1923.
- [2] R. M. German, "A-Z of powder metallurgy", Oxford, UK: Elsevier Advanced Technology, 2005.
- [3] H. Kolaska & P. Ettmayer, "Geschichte der Hartmetalle (History of Hard Metals)," Book, 2013.
- [4] D. Mari, "Cermets and hardmetals, encyclopedia of materials: science and technology", Elsevier Science Ltd, pp.1118-1123, 2001.
- [5] W. Lengauer, "Hardmetals and cermets; actual tendencies of development (in German)", Contribution to the planned book of Kolaska and Ettmayer, 2013.
- [6] M. Humenik Jr & N. M. Oarikh, "Cermets: I, Fundamental Concepts Related to Micro-structure and Physical Properties of Cermet Systems", J. Am. Ceram. Soc, vol. 39, pp. 60-63, 1956.
- [7] W. Lengauer & F. Scagnetto, "Ti (C, N)-based cermets: critical review of achievements and recent developments", Solid State Phenomena, vol. 274, 53-100, 2018.

- [19] W. D. Schubert, E. Lassner & W. Boehlke, "Cemented carbides—a success story", in: Tungsten, Int. Tungsten Industry Association (ITIA), June 2010.
- [20] S. Ahn & S. Kang, "Formation of Core/Rim Structures in Ti (C,N)-WC-Ni Cermets via a Dissolution and Precipitation Process", J. Am. Ceram. Soc, vol. 83, pp. 1489–1494, 2000.
- [21] W. Wan, J. Xiong & M. Liang, "Effects of secondary carbides on the microstructure, mechanical properties and erosive wear of Ti(C,N)-based cermets", Ceram. Int, vol. 43, no. 1, pp. 944–952, 2017.
- [22] D. Park & Y. Lee, "Effect of carbides on the microstructure and properties of Ti(C,N) based Ceramics", J. Am. Ceram. Soc, vol. 82, no. 11, pp. 3150–3154, 1999.
- [23] "Gesintertes Hartmetall Österr", Pat. 160172, 1931.
- [24] H. Kolaska, "Powder metallurgy of hardmetals (in German)", Hagen: Fachverband Pulvermetallurgie; 1992.
- [25] K. Dreyer & H. van den Berg, "Neue Cermet-Schneidwerkstoffe-Stand der Technik heute", Keram. Z, 52 2000.
- [26] R. Kieffer, "Sintered hard alloy and method of making", US Patent 3741733, UGINE CARBONE, 1973.
- [27] S. Zhang, "Titanium carbonitride-based cermets: processes and properties", Mater. Sci. Eng, vol. A 163, no. 1, pp. 141–148, 1993.
- [28] D. Moskowitz & L. L. Turner, "Cemented titanium carbonitrides: Effects of temperature and carbon-to-nitrogen ratio", Mater. Sci. Eng, vol. 105–106, pp. 265–268, 1988.
- [29] V. A. Tracey, "Nickel in hardmetals", Int. J. Refract. Met. Hard Mater, vol. 11, no. 3, pp. 137–149, 1992.
- [30] G. E. D'Errico, "Tool-life reliability of cermet inserts in milling tests", J. Mater. Process. Technol, vol. 77, pp. 337–343, 1988.
- [31] Y. Peng, H. Miao & Z. Peng, "Development of TiCN-based cermets: Mechanical properties and wear mechanism", Int. J. Refract. Met. Hard Mater, vol. 39, pp. 78–89, 2013.
- [8] L. Heydari, P. F. Lietor, F. A. Corpas-Iglesias & O. H. Laguna, "Ti(C,N) and WC-Based Cermets: A Review of Synthesis, Properties and Applications in Additive Manufacturing", Materials, vol. 14, no. 22, p. 6786, 2021.
- [9] H. Ortner, H. Kolaska & P. Ettmayer, "The history of the technological progress of hardmetals", Int. J. Refract. Met. Hard Mater, vol. 44, pp. 148–159, 2014.
- [10] K. Schröter, "Gesinterte harte Metallegierung und Verfahren zu ihrer Herstellung", German Patent DE420689, 1923.
- [11] P. Schwarzkopf & I. Hirschl, "Mehrere Metallkarbide enthaltendes Hartmetall", Insbesondere für Formkörper oder Werkzeigteile Austrian Patent AT160172, 1931.
- [12] R. Kieffer & F. Kölbl, "Über die Entwicklung und Eigenschaften warm- und zunderfester Hartlegierungen auf Titankarbidbasis mit Nickel-Kobalt-Chrom-Bindern Planseeber", Pulvermetall, vol. 1, pp. 17–35, 1952.
- [13] T. Claar, W. B. Johnson, C. A. Andersson & G. H. Schiroy, "Microstructure and Properties of Platelet-Reinforced Ceramics Formed by the Directed Reaction of Zirconium with Boron Carbide", In Book 13th Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Editor(s): John, B., Wachtman, Jr., Wiley, United States, vol. 10, pp. 599–609, 1989.
- [14] "European Hard Materials Group (EuroHM)", <https://www.epma.com/european-hard-materials-group>.
- [15] Ch. Mitterer, "PVD and CVD Hard Coatings", Encyclopedia Comprehensive Hard Materials, vol. 2, pp. 449–467, 2014.
- [16] A. Inspektor & P. A. Salvador, "Architecture of PVD coatings for metal cutting applications: a review", Surf. Coat. Technol, vol. 257, pp. 138–153, 2014.
- [17] R. Haubner, M. Lessiak, R. Pitonak, A. Köpf & R. Weissenbacher, "Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools", Int. J. Refract. Met. Hard Mater, vol. 62, pp. 210–218 Part B, 2017.
- [18] "International Tungsten Industry Association", www.itia.info.

- [43] S. Y. Zhang, "Titanium carbonitride-based cermets: processes and properties", *Mater. Sci. Eng.*, vol. A 163, pp. 141–148, 1993.
- [44] S. A. Jose, M. John & P. L. Menezes, "Cermets systems: synthesis, properties, and applications", *Ceramics*, vol. 5, no. 2: pp. 210-236, 2022.
- [45] A. G. Dela Obra, Y. Torres, M. A. Aviles & E. Chicardi, "A new family of cermets: chemically complex but microstructurally simple", *Int J Refract Hard Met*, vol. 63, pp. 17-25, 2017.
- [46] R. S. Parihar, S. G. Setti & R. K. Sahu, "Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: A review", *Sci. Eng. Compos. Mater*, vol. 25, pp. 309–336, 2018.
- [47] F. G. Caballero, "Encyclopedia of materials: metals and alloys", (No Title), 2021.
- [48] R. German, "Sintering Theory and Practice", John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [49] W. Schaaf, "Sintervorgänge: Grundlagen", VDI Verlag GmbH, 1992.
- [50] Z. Zak Fang, X. Wang, T. Ryu, K. S. Hwang & H. Y. Song, "Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide— a review", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 27, p. 288, 2009.
- [51] C. J. R. González Oliver, E. A. Álvarez & J. L. García, "Kinetics of densification and grain growth in ultrafine WC-Co composites", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 59, pp. 121–131, 2016.
- [52] J. García, W. Strelesky & M. Lackner (Ed.), "Chapter 9: Process Development and scale up of cemented carbide production in Scale-up in Metallurgy", Verlag ProcessEng GmbH, pp. 235–265, 2010.
- [53] T. Y. Kosolapova, "Carbides", Springer, New York, United States, p51, 1971.
- [۵۴] ا. ح. امامی، س. ک. حسینی و د. داوودی، "تولید نانوپودر کامپوزیتی نیکل - کاربید وانادیم از مواد اولیه اکسیدی به روش مکانوشیمیایی"، *فرآیندهای نوین در مهندسی مواد*، شماره ۴، صفحه ۲۹–۳۹، ۱۳۹۷.
- [55] B. Kear & L. McCandlish, "Chemical processing and properties of nanostructured WC-Co materials", *Nanostructured Mater*, vol. 3, pp. 19–30, 1993.
- [32] P. Feng, W. H. Xiong & L. X. Yu, "Metallurgical Reaction Foundation and Microstructural Characterization of Ti(C,N)-Based Cermets Part I: Metallurgical Reaction Foundation during Sintering", *Mater Rev*, vol. 18, pp. 9–11, 2004.
- [33] U. Rolander, G. Weinl & P. Lindahl, "Hans-Olof Andrén. Titanium-based carbonitride alloy with controllable wear resistance and toughness", US Patent 6129891, AB Sandvik, 1995.
- [34] T. Lenskaya, V. Toropchenov & et al, "Manufacture and Application of Cemented Carbides", *Metallurgia*, Moscow, p. 107, 1982.
- [35] M. Zwinkels, U. Rolander, G. Weinl & A. Piirhonen, "Method for producing Ti (C, N)—(Ti,Ta,W) (C,N)—Co alloys for cutting tool applications", US Patent 6290902, AB Sandvik, 2001.
- [36] U. Rolander, M. Zwinkels & G. Weinl, "Ti(C,N)-(Ti,Nb,W)(C,N)-Co alloy for finishing and semifinishing turning cutting tool applications", US Patent US7157044, AB Sandvik, 2007.
- [37] H. Xiong, Y. Wen, X. Gan, Z. Li & L. Chai, "Influence of coarse TiCN content on the morphology and mechanical properties of ultrafine TiCN-based cermets", *Mater. Sci. Eng.*, vol. A 682, pp. 648–655, 2017.
- [38] D. Moskowitz & L. L. Turner, "Cemented titanium carbonitrides: Effects of temperature and carbon-to-nitrogen ratio", *Mater. Sci. Eng.*, vol. A 105–106, no. Part 1, pp. 265–268, 1988.
- [39] Y. Kang & S. Kang, "The surface microstructure of TiC-(Ti,W)C-WC-Ni cermets sintered in a nitrogen atmosphere", *Mater. Sci. Eng.*, vol. A 27–28, pp. 7241–7246, 2010.
- [40] I. Sadik, "An Introduction to Cutting Tools Materials and Applications", AB Sandvik Coromant, 2013.
- [41] P. Ettmayer, H. Kolaska, W. Lengauer & K. Dreyer, "Ti(C,N) cermets-Metallurgy and Properties", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater* vol. 13, pp. 343–351, 1995.
- [42] S. Cardinal, A. Malchère, V. Garnier & G. Fantozzi, "Microstructure and mechanical properties of TiC–TiN based cermets for tools application", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 27, pp. 521–527, 2009.

- [67] P. Regenfuss, A. Streek, F. Ullmann & C. Kühn, "Laser micro sintering of ceramic materials", part 2. *Interceram*, vol. 57, no. 1, pp. 6-9, 2008.
- [68] R. S. Khmyrov, V. A. Safronov & A. V. Gusarov, "Synthesis of nanostructured WC-Co hardmetal by selective laser melting", *Procedia IUTAM*, vol. 23, pp. 114-119, 2017.
- [69] E. Uhlmann, A. Bergmann & W. Gridin, "Investigation on additive manufacturing of tungsten carbide-cobalt by selective laser melting", *Procedia Cirp*, vol. 35, pp. 8-15, 2015.
- [70] B. AlMangour & D. Grzesiak, "Selective laser melting of TiC reinforced 316L stainless steel matrix nanocomposites: Influence of starting TiC particle size and volume content", *Materials & Design*, vol. 104, pp. 141-151, 2016.
- [71] S. Kumar, J. P. Kruth & L. Froyen, "Wear behaviour of SLS WC-Co composites", 2008.
- [72] J. García, V. Collado Ciprés, A. Blomqvist & B. Kaplan, "Cemented carbide microstructures: a review", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 80, pp. 40-68, 2019.
- [73] P. Ettmayer, "Hardmetals and cermets", *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 145-164, 1989.
- [74] S. Lay, "HRTEM investigation of dislocation interactions in WC", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 41, pp. 416-421, 2013.
- [75] S. Huang, J. Xiong, Z. Guo, W. Wana, L. Tang, H. Zhong, W. Zhou, B. Wang, "Oxidation of WC-TiC-TaC-Co hard materials at relatively low temperature", *Int J Refract Hard Met*, vol. 48, pp. 134-140, 2015.
- [76] K. Tsuda, "History of development of cemented carbides and cermet", *SEI Technical Review*, vol. 82, pp. 16-20, 2016.
- [77] H. Kolaska, "Hartmetall- gestern, heute und morgen", *Metall Jahrgang*, pp. 825-832, 2007.
- [78] R. Kieffer & F. Benesovsky, "Hartmetalle", Springer Verlag, 1965.
- [79] K. J. A. Brookes, "World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard Materials", 6th Ed., *Int. Carbide Data*, 1996.
- [80] R. B. Bhagat, J. C. Conway Jr, M. F. Amateau & R. A. Brezler III, "Tribological performance evaluation
- [56] L. McCandlish, B. Kear & B. Kim, "Chemical processing of nanophase WC-Co composite powders", *Mater. Sci. Technol*, vol. 6, pp. 953-957, 1990.
- [57] N. Al-Aqeeli, N. Saheb, T. Laoui & K. Mohammad, "The Synthesis of nanostructured WC-based hardmetals using mechanical alloying and their direct consolidation", *J. Nanomater*, pp. 1-16, 2014.
- [58] R. German, "Sintering Theory and Practice", John Wiley & Sons Inc, New York, United States, 1996.
- [59] J. Niittynen, R. Abbel, M. Mäntysalo, J. Perelaer, U. S. Schubert & D. Lupo, "Alternative sintering methods compared to conventional thermal sintering for inkjet printed silver nanoparticle ink", *Thin Solid Films*, vol. 556, pp. 452-459, 2014.
- [60] S. Zavadiuk, P. Loboda, T. Soloviova & I. Trosnikova, "Optimization of the sintering parameters for materials manufactured by powder injection molding", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 59: pp. 22-28, 2020.
- [61] B. Mouawad, M. Soueidan, D. Fabrègue & C. Buttay, "Full densification of molybdenum powders using spark plasma sintering", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43, pp. 3402-3409, 2012.
- [62] K. J. Brookes, "3D-printing style additive manufacturing for commercial hardmetals", *Metal Powder Report*, vol. 70, no. 3, pp. 137-140, 2015.
- [63] J. Ruiz-Morales, A. Tarancón, J. Canales-Vázquez, J. Méndez-Ramos, L. Hernández-Afonso, P. Acosta-Mora, J. R. Marín Ruedac & R. Fernández-González, "Three dimensional printing of components and functional devices for energy and environmental applications", *Energy & Environmental Science*, vol. 10, no. 4, pp. 846-859, 2017.
- [64] J. Deckers, J. Vleugels & J. P. Kruth, "Additive manufacturing of ceramics: A review", *J. Ceram. Sci. Technol*, vol. 5, no. 4, pp. 245-260, 2014.
- [65] K. V. Wong & A. Hernandez, "A review of additive manufacturing", *International scholarly research notices*, no. 1, p. 208760, 2012.
- [66] A. Davydova, A. Domashenkoff, A. Sova & I. Movchan, "Selective laser melting of boron carbide particles coated by a cobalt-based metal layer", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 229, pp. 361-366, 2016.

- [92] A. Markström, K. Frisk & B. Sundman, "A revised thermodynamic description of the Co-W-C system", *J. Phase Equilib. Diffus.*, vol. 26, no. 2, pp. 152–160, 2005.
- [93] X. Ren, Z. Peng, Y. Peng, Z. Fu, C. Wang, L. Qi & et al, "Effect of SiC nano-whisker addition on WC–Ni based cemented carbides fabricated by hot-press sintering", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 36, pp. 294–299, 2013.
- [94] M. Woydt & H. Mohrbacher, "Friction and Wear of binder-less niobium carbide", *Wear*, vol. 1–2, pp. 126–130, 2013.
- [95] M. Woydt, H. Mohrbacher, J. Vleugels & S. Huang, "Niobium carbide for wear protection– tailoring its properties by processing and stoichiometry", *Metal Powder Rep.*, vol. 71, no. 4, pp. 265–272, 2016.
- [96] J. F. Smith & O. N. Carlson, "The niobium carbon system", *J. Nucl. Mater.*, vol. 148, pp. 1–16, 1987.
- [97] "REACH", http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/reach_intro.htm.
- [98] H. Moon, B. K. Kim & S. J. L. Kang, "Growth mechanism of round-edged NbC grains in Co liquid", *Acta Mat.*, vol. 49, pp. 1293–1299, 2001.
- [99] M. Woydt & H. Mohrbacher, "The tribological and mechanical properties of niobium carbides (NbC) bonded with cobalt or Fe3Al", *Wear*, vol. 321, pp. 1–7, 2014.
- [100] M. Schwarzkopf, H. E. Exner, H. F. Fischmeister & W. Schintlmeister "Kinetics of compositional modification of (W, Ti) C-WC-Co alloy surfaces", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 105, pp. 225–231, 1988.
- [101] J. Garcia & O. Prat, "Experimental investigations and DICTRA simulations on formation of diffusion-controlled fcc-rich surface layers on cemented carbides", *Applied surface science*, vol. 257, no. 21, pp. 8894–8900, 2011.
- [102] H. O. Andrén, "Microstructures of cemented carbides", *Materials & Design*, vol. 22, no. 6, pp. 491–498, 2001.
- [103] J. Kim & S. Kang, "WC platelet formation via high-energy ball mill", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 47, pp. 108–112, 2014.
- of tungsten carbide-based cermets and development of a fracture mechanics wear model", *Wear*, vol. 201, no. 1–2, pp. 233–243, 1996.
- [81] B. Roebuck, M. G. Gee & R. Morrell, "Hardmetals- Microstructural Design, Testing and Property Maps", in: G. Kneringer, P. Rödhammer, H. Wildner, A.G. Plansee Holding (Eds.), 15 International Plansee Seminar, vol. 4 Reutte, p. HM84, 2001.
- [82] S. Johansson & G. Wahnström, "A computational study of thin cubic carbide films in WC/Co interfaces", *Acta Mater.*, vol. 59, pp. 171–181, 2011.
- [83] S. Lay & J. Thibault, "Structure and role of the interfacial layers in VC-rich WC-Co cermets", *Philos. Mag.*, vol. 83, no. 10, pp. 1175–1190, 2003.
- [84] W. D. Schubert, A. Bock & B. Lux, "General aspects and limits of conventional ultrafine WC powder manufacture and hard metal production", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 13, no. 5, pp. 281–296, 1995.
- [85] E. Rudy, B. F. Kieffer & E. Baroch, "HfN coatings for cemented carbides and new hardfacing alloys on the basis (Mo,W)C-(Mo,W)2C, Planseeber", *Pulvermetall.*, vol. 26, pp. 105–115, 1978.
- [86] W. D. Schubert, "Doped Hexagonal Tungsten Carbide and Method for Producing Same", Patent application WO2012145773, 2011.
- [87] S. Norgren, J. García, A. Blomqvist & L. Yin, "Trends in the P/M hard metal industry", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 48, pp. 31–45, 2015.
- [88] K. Frisk, "Study of the Effect of Alloying Elements in Co-WC Based Hardmetals by Phase Equilibrium Calculations". 2009.
- [89] C. Barbatti, J. Garcia, P. Brito & A. R. Pyzalla, "Influence of WC replacement by TiC and (Ta, Nb) C on the oxidation resistance of Co-based cemented carbides", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 27, no. 4, pp. 768–776, 2009.
- [90] M. Hellsing, A. Henjered, H. Nordén & H. O. Andrén, "Atom-probe microanalysis of WC-Co based cemented carbides, Science of Hard Materials", Springer US, p. 93, 1983.
- [91] T. Johansson & B. Uhrenius, "Phase equilibria, isothermal reactions, and a thermodynamic study in the Co-WC system at 1150°", *C. Metal Science*, vol. 12, no. 2, p. 83, 1983.

- [115] Z. Roulon, J. M. Missiaen & S. Lay, "Shrinkage and microstructure evolution during sintering of cemented carbides with alternative binders", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 101, p. 105665, 2021.
- [116] "Cobalt monograph Centre d'Information du Cobalt", Brussels Belgium (1960).
- [117] J. M. Marshall & M. Giraudel, "The role of tungsten in the Co binder: Effects on WC grain size and hcp-fcc Co in the binder phase", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 49, pp. 57–66, 2015.
- [118] K. P. Mingard, B. Roebuck, J. Marshall & G. Sweetman, "Some aspects of the structure of cobalt and nickel binder phases in hardmetals", *Acta Mater*, vol. 59, pp. 2277–2290, 2011.
- [119] L. Prakash & B. Gries, "WC hardmetals with iron based binders", in: L. Sigl, P. Rödhammer, S. Wildner (Eds.), *Proc 17th International Plansee Seminar*, Reutte, vol. 2, Austria. (HM 5). 2009.
- [۱۲۰] ب. طولمی‌نژاد، ح. عربی و م. شاهمیری، "بررسی تأثیر سیکل عملیات حرارتی بر استحکام گسیختگی عرضی و ریزساختار بهینه هاردمتال کاربید تنگستن - کبالت". *فرآیندهای نوین در مهندسی مواد*، شماره ۱، صفحه ۵۳-۵۸، ۱۳۸۷.
- [121] A. Rajabi, M. Ghazali & A. Daud, "Chemical composition, microstructure and sintering temperature modifications on mechanical properties of TiC-based cermet-A review", *Materials & Design*, vol. 67, pp. 95-106, 2015.
- [122] D. Linder, E. Holmström & S. Norgren, "High entropy alloy binders in gradient sintered hardmetal", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 71, pp. 217-220, 2018.
- [123] P. E. Zhou, D. H. Xiao & T. C. Yuan, "Comparison between ultrafine-grained WC-Co and WC-HEA-cemented carbides", *Powder Metallurgy*, vol. 60, no. 1, pp. 1-6, 2017.
- [124] H. C. Kim, I. J. Shon, J. K. Yoon, J. M. Doh & Z. A. Munir, "Rapid sintering of ultrafine WC-Ni cermets", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 24, no. 6, pp. 427-431, 2006.
- [125] E. Ghasali, A. Shahmorad, Y. Orooji, A. Faraji, K. Asadian, M. Alizadeh & T. Ebadzadeh, Effects of vanadium and titanium addition on the densification, microstructure and mechanical properties of WC-Co
- [104] S. Norgren & J. García, "On gradient formation in alternative binder cemented carbides", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 73, pp. 106-110, 2018.
- [105] P. Gustafson & Å. Östlund, "Binder-phase enrichment by dissolution of cubic carbides", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 12, pp. 129–136, 1994.
- [106] J. García, G. Lindwall, O. Prat & K. Frisk, "Kinetics of formation of graded layers on cemented carbides: experimental investigations and DICTRA simulations", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 29, pp. 256–259, 2011.
- [107] J. García & W. Lengauer, "Quantitative mass spectrometry of decarburisation and denitridation of cemented carbonitrides during sintering", *Mikrochim. Acta*, vol. 136, pp. 83–89, 2001.
- [108] D. S. Janisch, W. Lengauer, A. Eder, K. Dreyer, K. Rödiger, H. W. Daub, D. Kassel & H. van den Berg, "Nitridation sintering of WC-Ti (C, N)-(Ta, Nb) C-Co hardmetals", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 36, pp. 22-30, 2013.
- [109] J. Garcia, "Influence of Fe-Ni-Co binder composition on nitridation of cemented carbides", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 30, no. 1, pp. 114-120, 2012.
- [110] J. Garcia, "Effect of cubic carbide composition and sintering parameters on the formation of wear resistant surfaces on cemented carbides", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 36, pp. 66-71, 2013.
- [111] V. Ucakar, K. Dreyer & W. Lengauer, "Near-surface microstructural modification of (Ti, W)(C, N)/Co hardmetals by nitridation", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 20, no. 3, pp. 195-200, 2002.
- [112] J. García, "Influence of Fe-Ni-Co binder composition on nitridation of cemented carbide", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 30, no. 11, pp. 114–120, 2012.
- [113] U. Fischer, E. T. Hartzell & J. Akerman, "Cemented carbide body used preferably for rock drilling and mineral cutting", *US Patent No. 4,743,515*, AB Sandvik, 1988.
- [114] B. Straumal & I. Konyashin, "WC-Based cemented carbides with high entropy alloyed binders: A review", *Metals*, vol. 13, no. 1, p. 171, 2023.

- [137] J. Long, W. Zhang, Y. Wang, Y. Du, Z. Zhang, B. Lu, K. Cheng & Y. Peng, "A new type of WC-Co-Ni-Al cemented carbide: grain size and morphology of γ' -strengthened composite binder phase", *Scr. Mater.*, vol. 126, pp. 33–36, 2017.
- [138] M. Johnson, D. E. Mikkola, P. A. March & R. N. Wright, "The resistance of nickel and iron aluminides to cavitation erosion and abrasive wear", *Wear*, vol. 140, pp. 279–289, 1990.
- [139] M. Habibi Rad & M. Ahmadian, "Golozar Investigation of the corrosion behavior of WC-FeAl-B composites in aqueous media", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 35, pp. 62–69, 2012.
- [140] M. Mottaghi & M. Ahmadian, "Comparison of the wear behavior of WC/(FeAl-B) and WC-Co composites at high temperatures", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 67, pp. 105–114, 2017.
- [141] C. Bonjour, "Nouveaux développements dans les outils de coupe en carbure fritte", *Wear*, vol. 62, no. 1, pp. 83–122, 1980.
- [142] J. H. Potgieter, N. Thanjekwayo, P. Olubambi, N. Maledi & S. S. Potgieter-Vermaak, "Influence of Ru additions on the corrosion behaviour of WC-Co cemented carbide alloys in sulphuric acid", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 29, no. 4, pp. 478–487, 2011.
- [143] A. F. Lisovskii, "Cemented carbides alloyed with Ruthenium, Osmium and Rhenium", *Powder Met Met Cer*, vol. 39, pp. 9–10, 2000.
- [144] G. R. Goren-Muginstein, S. Berger & A. Rosen, "Sintering study of nanocrystalline tungsten carbide powders", *Nanostruct. Mater*, vol. 10, no. 5, pp. 795–804, 1998.
- [145] S. Imasato, K. Tokumoto, T. Kitada & S. Sakaguchi, "Properties of Ultra-Fine Grain Binderless Cemented Carbide RCCFN", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 13, pp. 305–312, 1995.
- [146] P. Ettmayer & W. Lengauer, "The story of cermets", *Powder Metall. Int*, vol. 21, no. 2, pp. 37–38, 1989.
- [147] A. Aramian, Z. Sadeghian, M. Narimani & N. Razavi, "Filippo Berto c A review on the microstructure and properties of TiC and Ti (C, N) based cermets", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 115, p. 106320, 2023.
- cermets. *Ceramics International*, vol. 47, no. 10, pp. 14270–14279, 2021.
- [126] L. Prakash, "A review of the properties of WC hardmetals with alternative binder systems", in: H. Bildstein, R. Eck (Eds.), *Proc 13th Plansee Seminar, Reutte Tirol*, vol. 2, p. HM 9, 1993.
- [127] H. Y. Rong, Z. J. Peng, X. Y. Ren, Y. Peng, C. B. Wang, Z. Q. Fu & et al, "Ultrafine WC-Ni cemented carbides fabricated by spark plasma sintering", *Mater. Sci. Eng*, vol. A 532, pp. 543–547, 2012.
- [128] M. Carpenter, "Hardmetal products made from pre-alloyed binder", *Proc Euro PM'2011 Barcelona, Spain*, Paper, no. 136, 2011.
- [129] M. Aristizabal, L. C. Ardila, F. Veiga, M. Arizmendi, J. Fernandez & J. M. Sánchez Moreno, "Comparison of the friction and wear behaviour of WC-Ni-Co-Cr and WC-Co hardmetals in contact with steel at high temperatures", *Wear*, vol. 280, no. 20, pp. 15–21, 2012.
- [130] E. O. Correa, J. N. Santos & A. N. Klein, "Microstructure and mechanical properties of WC Ni-Si based cemented carbides developed by powder metallurgy", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 28, no. 5, pp. 572–575, 2010.
- [131] C. S. Chen, C. C. Yang, H. Y. Chai, J. W. Yeh & J. L. H. Chau, "Novel cermet material of WC/multi-element alloy", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 43, pp. 200–204, 2014.
- [132] G. Zhu, Y. Liu & J. Ye, "Fabrication and properties of Ti(C,N)-based cermets with multi-component AlCoCrFeNi high-entropy alloys binder", *Mater. Lett*, vol. 113, pp. 80–82, 2013.
- [133] A. G. de la Odra, M. A. Avilés, Y. Torres, E. Chicardi & F. J. Gotor, "A new family of cermets: Chemically complex but microstructurally simple", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 63, pp. 17–25, 2017.
- [134] D. Linder, "Master thesis", KTH, Stockholm, 2016.
- [135] S. Nakonechnyi, A. Yurkova & P. Loboda, "WC-based cemented carbide with NiFeCrWMo high-entropy alloy binder as an alternative to cobalt", *Vacuum*, vol. 222, p. 113052, 2024.
- [136] L. Liang, X. Liu, X. Q. Li & Y. Y. Li, "Wear mechanisms of WC-10Ni3Al carbide tool in dry turning of Ti6Al4V", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, vol. 48, pp. 272–285, 2015.

microstructures and mechanical properties of binderless tungsten carbide", *Mater Trans*, vol. 53, pp. 1475-1480. 2012.

[161] M. Monzón, R. Paz, Z. Ortega & N. Diazet, "Knowledge transfer and standards needs in additive manufacturing, in Additive manufacturing– Developments in training and education", In Book Additive Manufacturing – Developments in Training and Education. Editor(s): Pei, E., Monzón, M., Bernard, A., Springer, New York, United states, pp. 1-13, 2019.

[162] J. Tarragó, C. Ferrari, B. Reig, D. Coureaux, L. Schneider & L. Lanes, "Mechanics and mechanisms of fatigue in a WC–Ni hard metal and a comparative study with respect to WC–Co hardmetals", *Int J Fatigue*, vol. 70, pp. 252-257, 2015.

[163] P. Ettmayer, H. Kolaska, W. Lengauer & K. Dreyer, "Ti(C,N) Cermets – Metallurgy and Properties", *Int. J.Refr.Met. & Hard. Mater*, vol. 13, pp. 343-351, 1995.

[164] W. Lengauer, "Carbides: Transition-Metal Solid-State Chemistry". In Book Encyclopedia of inorganic and bioinorganic chemistry. Editor: Csott, R.A. John Wiley & Sons, NewYork, United States, 2011.

[165] H. O. Andrén, "Microstructure of cemented carbides", *Mat Design*, vol. 22, pp. 491–498. 2001.

[166] C. Friedrich, G. Berg, E. Broszeit & C. Berger, "Datensammlung zu Hartstoff-eigenschaften", *Mat-wiss u Werkstofftech*, vol. 28, no. 2, pp. 59–76, 1997.

[167] W. Lengauer, "Transition metal carbides, nitrides and carbonitrides in: handbook of ceramic hard materials", Ed Ralf Riedel, vol. 1, pp. 202–252, 2000.

[148] J. G. Miranda-Hernández, S. D. De La Torre & E. Rocha-Rangel, "Synthesis, microstructural analysis and mechanical properties of alumina-matrix cermets", *Epa.-J. Silic. Based Compos. Mater*, no. 1, 2010.

[149] A. Sova, A. Papyrin & I. Smurov, "Influence of ceramic powder size on process of cermet coating formation by cold spray", *Journal of thermal spray technology*, vol. 18, pp. 633-641, 2009.

[150] A. J. Ruys, "Alumina ceramics: biomedical and clinical applications", Woodhead Publishing, 2018.

[151] J. Kübarsepp, H. Reshetnyak & H. Annuka, "Characterization of the serviceability of steel-bonded hardmetals", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 12, no. 6, pp. 341-348, 1993.

[152] J. Kübarsepp, H. Klaasen & J. Pirso, "Behaviour of TiC-base cermets in different wear conditions", *Wear*, vol. 249, no. 3-4, pp. 229-234, 2001.

[153] S. Zhang & G. Lu, "Sintering of Ti (C, N)-based cermets: the role of compaction", *MATERIAL AND MANUFACTURING PROCESS*, vol. 10, no. 4, pp. 773-783, 1995.

[154] I. Hussainova, "Effect of microstructure on the erosive wear of titanium carbide-based cermets", *Wear*, vol. 255, no. 1-6, pp. 121-128, 2003.

[155] Z. Geng, Z., S. Li, D. L. Duan & Y. Liu, "Wear behaviour of WC–Co HVOF coatings at different temperatures in air and argon", *Wear*, vol. 330, pp. 348-353, 2015.

[156] E. M. Trent, "Metal cutting", 3rded.Oxford, London etc.:Butter worth-Heinemann Ltd; 1991.

[157] C. Li, M. Yi, G. Wei, Z. Chen, G. Xiao, J. Zhang, T. Zhou, G. Wu & C. Xu, "Effect of multilayer core-shell microstructure on mechanical properties of Ti (C, N) based self-lubricating cermet materials", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 817, p. 153197. 2020.

[158] N. J. Dudney, W. West & J. Nanda, "Handbook of Solid State Batteries", 2nd ed.; World Scientific, Singapore, p. 253. 2015.

[159] B. Mondal, P. Das & S. Singh, "Advanced WC–Co cermet composites with reinforcement of TiCN I. prepared by extended thermal plasma route", *Mater. Sci. Eng, A*, vol. 498, pp. 59-64. 2008.

[160] A. Nino, K. Takahashi, S. Sugiyama & H. Taimatsu, "Effects of carbon addition on

۶- پی نوشت

- [1] Hardmetal
- [2] Cemented Carbide
- [3] Schröter
- [4] Cermet
- [5] R.M. German
- [6] Kolaska & Ettmayer
- [7] Mari
- [8] Lengauer
- [9] Core-rim
- [10] Binder
- [11] Wettability
- [12] Chemical Vapor Deposition

- | | |
|--------------------------------|---|
| [23] Selective laser sintering | [13] Physical Vapor Deposition |
| [24] Khmyrov et al | [14] Hot isostatic pressing |
| [25] Dopping | [15] Spark Plasma Sintering |
| [26] Inserts | [16] Electrical resistance sintering |
| [27] Garcia et al | [17] High frequency induction heated sintering |
| [28] High Entropy Alloys | [18] Pulse plasma sintering |
| [29] Kim | [19] Ultrahigh pressure rapid hot consolidation |
| [30] Ghasali | [20] η phase |
| [31] Nakonechnyi et al | [21] Additive manufacturing |
| [32] Miranda-Hernández et al | [22] Selective laser melting |